

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Návrh osvětlení průmyslové haly
v Třineckých železárnách, a.s.**

**Light projekt of industrial hall
in Třinecké železářny, a.s.**

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Šiška**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh osvětlení průmyslové haly v Třineckých železárnách, a.s.**

Light project of industrial hall in Třinecké železářny a.s.

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor výpočetních metod pro navrhování vnitřního osvětlení a udržovacího činitele
2. Přehled světelných zdrojů a svítidel pro osvětlování průmyslových hal
3. Normativní požadavky na osvětlování průmyslových hal
4. Posouzení stávajícího stavu osvětlení průmyslové haly
5. Výpočty denního osvětlení průmyslové haly
6. Výpočty umělého osvětlení průmyslové haly
7. Možnosti řízení osvětlovací soustavy v kombinaci s denním světlem
8. Ekonomické vyhodnocení obnovy osvětlovací soustavy

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Plch, J.: Světelná technika v praxi. IN-EL spol. s.r.o., Praha 1999,
- [2] Habel, J.: Světelná technika a osvětlování. FCC Public, Praha 1995,
- [3] Sokanský, K. a kol.: Dominantní vlivy ovlivňující spotřebu elektrické energie osvětlovacích soustav, www.csorsostrava.cz
- [4] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU
- [5] Normy - ČSN EN 12464 – 1, ČSN 73 580, CIE 97

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Novák, Ph.D.**

Datum zadání: 20.11.2009
Datum odevzdání: 07.05.2010

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Touto cestou bych chtěl vyjádřit poděkování vedoucímu diplomové práce
Ing. Tomáši Novákovi, Ph.D. a prof. Ing. Karlovi Sokanskému, CSc. za odborné vedení.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomová práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 20. dubna 2010

.....
Vojtěch Šiška

Abstrakt

Tato diplomová práce má čtenáře seznámit s problematikou návrhu osvětlení v průmyslových halách. Představuje současné legislativní změny související s harmonizací českých norem s EU. Nové zásady v oblasti kvalitativních i kvantitativních požadavků při návrhu nové osvětlovací soustavy.

Praktická část této práce se pak zabývá posouzením denní osvětlenosti prostřednictvím matematického modelu a konkrétním návrhem a výpočtem umělého osvětlení ve dvou variantách. Klasická osvětlovací soustava a inovativní osvětlovací soustava.

Závěr práce se zabývá ekonomickým vyhodnocením jednotlivých variant.

This thesis would like to introduce the possibilities of the illumination in the production halls. Presents the part of the legislative changes connected with the coordination between czech and EU norm. The new fundamentals in the sphere of qualitative and quantitative requierements connected with the project of the new lighting systém.

Applaied part is about examination of illumination during the day throught matematic model and concrete project with the proposal and calculation of the artifical light in two option. The clasical lighting system and innovative lighting system.

The final of the thesis is about economical evaluation of the particular variants.

Klíčová slova

Osvětlení, denní osvětlení, umělé osvětlení, programy pro výpočet osvětlení, normy pro osvětlování, světelné zdroje, svítidla

Keywords

Illumination, diurnal illumination, illumination during the day, artifical illumination, the programs for the calculation of the illumination, norms for illumination, source of light, lighting units

Seznam použitých symbolů a zkratk

činitel denní osvětlenosti	D	%
oblohová složka činitele denní osvětlenosti	D_s	%
nejmenší činitel denní osvětlenosti	D_{\min}	%
největší činitel denní osvětlenosti	D_{\max}	%
průměrný činitel denní osvětlenosti	D_m	%
osvětlenost v kontrolním bodě	E	lx
průměrný jas oblohy	L_m	cd.m^{-2}
jas oblohy v zenitu	L_z	cd.m^{-2}
činitel jasu oblohy	q	-
činitel odrazu světla	ρ	-
činitel prostupu světla	τ_s	-
rozměr kritického detailu	d	m
rušivé oslnění	UGR	-
udržovaná osvětlenost	E_m	lx
index podání barev	R_a	-
Rovnoměrnost	g	-

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Rozbor výpočetních metod pro navrhování vnitřního osvětlení a udržovacího činitele..	9
2.1. Denní osvětlení	9
2.1.1. Bodové metody výpočtu činitele denní osvětlenosti	13
2.1.2. Tokové metody výpočtu činitele denní osvětlenosti.	15
2.1.3. Empirické metody.....	18
2.2. Umělé osvětlení	19
2.2.1. Výpočet osvětlovací soustavy tokovou metodou.	19
2.2.2. Výpočet osvětlovací soustavy bodovou metodou.	22
2.3. Počítačové simulace světelného prostředí	24
2.3.1. Metoda Monte Carlo ve světelnotechnických výpočtech.	24
2.3.2. Radiační metoda ve světelnotechnických výpočtech.	26
2.3.3. Programy na simulace světelného osvětlení.	26
2.4. Udržovací činitel	28
2.4.1. Činitelé způsobující změny v provozních parametrech osvětlovací soustavy.	28
2.4.2. Určení udržovacího činitele.	29
3. Přehled světelných zdrojů a svítidel pro osvětlování průmyslových hal.....	31
3.1. Teoretický rozbor světelných zdrojů	31
3.2. Charakteristika světelných zdrojů	33
3.3. Rozbor vybraných světelných zdrojů podle výrobců.....	51
3.3.1. Dostupné halogenidové výbojky	52
3.3.2. Dostupné indukční výbojky.....	53
3.4. Výběr typů vhodných svítidel.....	54
3.4.1. Světelně technické parametry svítidel.....	54
3.4.2. Kritéria výběru svítidel.....	57
3.5. Srovnání vhodných svítidel podle výrobců	58
4. Normativní požadavky na osvětlování průmyslových hal.....	62
4.1. Vnitřní pracovní prostory	62
4.2. Nouzové osvětlení	63
4.3. Denní osvětlení	63
4.4. Hygienické vyhlášky	63

5. Posouzení stávajícího stavu osvětlení průmyslové haly	64
5.1. Měření umělého osvětlení	64
6. Výpočty denního osvětlení průmyslové haly	65
6.1. Současný stav denní osvětlenosti.....	65
6.2. Výpočet denní osvětlenosti.....	66
7. Výpočty umělého osvětlení průmyslové haly.....	68
7.1. Klasická osvětlovací soustava.....	68
7.2. Inovativní osvětlovací soustava	68
8. Možnosti řízení osvětlovací soustavy v kombinaci s denním světlem	68
8.1. Stmívání.....	68
8.2. Přepínání okruhů	68
9. Ekonomické vyhodnocení obnovy osvětlovací soustavy	69
10. Závěr	69

1. Úvod

Světlo patří k důležitým faktorům, které významně podmiňují úroveň životního prostředí. Vyvolává v člověku fyziologické a psychologické reakce, které jsou ovlivňovány množstvím světelné energie, jejím časovým a prostorovým rozložením, druhem světla a jeho barevnou jakostí. Pomocí zraku člověk získává až 90% informací o prostředí, které ho obklopuje.

V České republice se spotřebovává asi 11% elektrické energie na osvětlení a v dobách energetických špiček to může být až 20%. Racionalizace v této oblasti může přinést značné úspory při zachování normovaných požadavků na hladiny osvětlení a dodržení hygienických předpisů.

Harmonizační procesy norem v Evropě se bezprostředně dotýkají i světelné techniky. Jedná se především o normu ČSN EN 12 464 – Světlo a osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory. Tento norma přináší volnější pohled na zásady osvětlování při návrhu nových osvětlovacích soustav.

Úkolem této diplomové práce je ukázat nové možnosti i směry v oblasti osvětlování průmyslových prostorů. Představit současné legislativní změny i nové možnosti světelných zdrojů, svítidel a výpočetních metod pro projektování denního osvětlení a osvětlovacích soustav.

2. Rozbor výpočetních metod pro navrhování vnitřního osvětlení a udržovacího činitele

2.1. Denní osvětlení

Aby bylo možno denní osvětlení výpočtem stanovit, je třeba skutečný prostor nahradit matematicko – fyzikálním modelem prostoru. Ve většině případů je třeba přijmout řadu zjednodušujících předpokladů. Nejčastěji se určují hodnoty činitele denní osvětlenosti jako základního parametru osvětlení požadovaného v příslušných předpisech. V některých případech se jako doplňující údaje určují jasy ploch a kontrast jasů.

Metod k výpočtu či stanovení parametrů denního osvětlení je velké množství. Vyvíjely se a dále budou vyvíjet podle stavu poznání a také podle vývoje úrovně výpočetní techniky. Většina metod se zabývá výpočtem činitele denní osvětlenosti na horizontální rovině v místnosti. Základní dělení výpočetních metod je na metody orientační a podrobné. Orientační metody se používají zejména při návrhu a umístění stavby v přípravných fázích projektu. Podrobné metody pak slouží zpravidla v průběhu projektové přípravy k detailnímu návrhu nebo k ověření parametrů již realizovaných staveb.

Z důvodu existence velkého množství různých výpočetních metod není postup výpočtu v současné době normalizován. Naopak jsou však poměrně přesně definovány vlastnosti, jaké musí podrobná výpočetní metoda splňovat, aby byl výpočet v souladu s normou¹.

Výpočtové metody pro určení činitele denní osvětlenosti lze rozdělit podle způsobu určení konečné hodnoty do těchto skupin:

- **Bodové metody** (pro určení osvětlenosti v daném bodě)
- **Tokové metody** (pro určení osvětlenosti dané plochy)
- **Empirické** aj. které není možno zařadit do předchozích dvou skupin
- **Statistické simulace světelného prostředí** (viz. kapitola 2.3.)

Bodovými metodami se určuje činitel denní osvětlenosti v daném bodě srovnávací roviny. Používají se k výpočtu oblohové složky a venkovní odražené složky činitele denní osvětlenosti.

Tokovými metodami se určuje průměrná hodnota činitele denní osvětlenosti na zadané ploše. Používají se na výpočet oblohové i odražených složek činitele denní osvětlenosti. Všeobecně jsou méně přesné než metody bodového výpočtu.

Empirické metody nám poskytují přibližné hodnoty pro určování denního osvětlení založené na odhadu, tradici nebo zkušenostech – např. poměr plochy okna k ploše podlahy. Do této skupiny lze též zařadit různé grafické metody, nomogramy apod., jejichž původ, odvození a podmínky použití nelze získat s dostupných parametrů.

Výběr výpočtové metody se určuje též podle toho, s jakými pomůckami se bude pracovat a s jakou přesností je nutno určit výsledek.

Bude-li při výpočtu používán počítač, pak se doporučuje pro výpočet oblohové složky a venkovní odražené složky činitele denní osvětlenosti numerická integrace dílčích osvětleností

¹ ČSN 73 0580-1 Denní osvětlení budov – Část 1: Základní požadavky

stanovených z průměru elementárních ploch do daného směru a jejich jasů. Pro výpočet vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti jsou vhodné postupy:

- toková účinnostní metoda výpočtu průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti při bočním osvětlení
- toková účinnostní metoda pro výpočet průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti při horním osvětlení
- rozložení vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti

Při výpočtu bez použití výpočetní techniky se v² doporučuje postupovat podle Kittlerova protraktoru pro výpočet oblohové složky a venkovní odražené složky činitele denní osvětlenosti je vhodná Toková účinnostní metoda pro výpočet průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti při horním osvětlení pro výpočet celkové hodnoty činitele denní osvětlenosti při osvětlení zenitními světélky. Vnitřní odraženou složku činitele denní osvětlenosti lze stanovit podle výpočtu vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti (podle B.R.S. a Kittnera), spolehlivější výsledky však dává postup Toková účinnostní metoda výpočtu průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti při bočním osvětlení a Rozložení vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti. Odraženou složku činitele denní osvětlenosti při horním osvětlení lze stanovit pomocí Tokové účinnostní metody pro výpočet průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti při horním osvětlení. Rozložení odražené složky činitele denní osvětlenosti se počítá podle části Rozložení vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti.

Metoda pro podrobný výpočet použitá pro návrh nebo posuzování denního osvětlení musí podle normy ČSN 73 0580-1 umožňovat zavést do výpočtu tyto vlivy³:

- a) rozložení jasu oblohy charakterizované činitelem jasu oblohy $q(-)$;
- b) ztráty světla při prostupu světlo propouštějícím materiálem konstrukce osvětlovacího otvoru charakterizované činitelem prostupu světla sklem $\tau_s(-)$ a činitelem prostupu světla tímto materiálem ve směru úhlu $\psi(^{\circ})$ měřeném od normály roviny skla $\tau_{\psi}(-)$;
- c) ztráty světla vlivem znečištění části osvětlovacího otvoru propouštějící světlo charakterizované činitelem znečištění $\tau_z(-)$;
- d) ztráty světla vlivem konstrukce osvětlovacího otvoru, která nepropouští světlo. Tyto ztráty jsou charakterizované činitelem prostupu světla $\tau_k(-)$ zohledňujícím vliv konstrukcí osvětlovacího otvoru nepropouštějícího světlo;
- e) ztráty světla vlivem zařízení pro regulaci osvětlení charakterizované činitelem prostupu světla $\tau_c(-)$ zohledňujícím vliv zařízení pro regulaci osvětlení;
- f) stínění venkovními překážkami, kde je nutno respektovat tvar stínící překážky;

² RYBÁŘ, Petr. Denní osvětlení a oslunění budov. 1. Vyd. Brno: ERA, 2001. 271 s. ISBN 80-86517-33-0

³ ČSN 73 0580-1 – Denní osvětlení budov – Část 1: Základní požadavky. ČNI, 2007. 24 s.

- g) odraz světla od venkovních povrchů, kde je nutno respektovat jas stínících překážek vyjádřených činitelem jasu $k_\gamma(-)$ nebo $k_m(-)$ stínící překážky nebo činitelem odrazu světla $\rho(-)$;
- h) mnohonásobný odraz světla od povrchů vnitřního prostoru v závislosti na jejich schopnosti odrážet světlo vyjádřené průměrným činitelem $\rho_m(-)$ odrazu světla povrchů v místnosti;
- i) ztráty světla stíněním konstrukcí budovy charakterizované činitelem prostupu světla $\tau_b(-)$ zohledňujícím vliv stínění konstrukce budovy;
- j) ztráty světla vlivem stínění zařízení ve vnitřním prostoru budovy (technickým nebo technologickým) charakterizované činitelem prostupu světla $\tau_v(-)$ zohledňujícím vliv stínění vnitřním zařízením budovy;

Aby byla zajištěna opakovatelnost výpočtu hodnot činitele denní osvětlenosti pro případ kontroly, musí každý výpočet obsahovat podrobnou kvantifikaci výše uvedených vlivů, tj. musí být uvedeny hodnoty všech činitelů ad a) až h), které byly ve výpočtu použity. U bodu ad g) postačí uvést průměrnou hodnotu činitele $k_\gamma(-)$, $k_m(-)$ nebo $\rho(-)$ pro průčelí objektu nebo pro plochu terénu mezi budovami.

Při rovnoměrně zatažené obloze a tmavém terénu se rozložení jasu oblohy stanoví podle vztahu:

$$L_\gamma = \frac{1}{3} L_z (1 + 2 \sin \gamma) \quad (1)$$

Vztah průměrného jasu oblohy L_m v cd/m^2 k jasu oblohy v zenitu L_z se stanoví při této obloze podle vztahu:

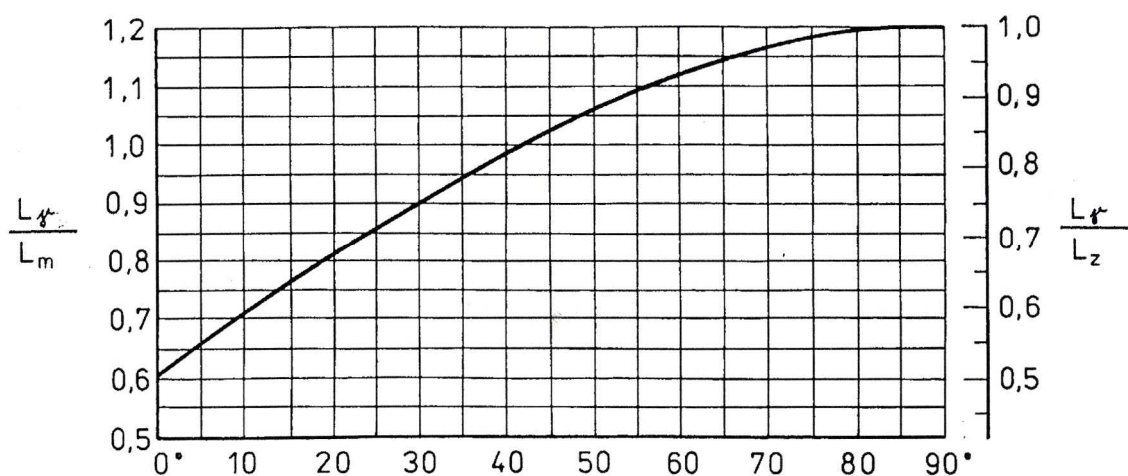
$$L_m = \frac{7}{9} L_z \quad (2)$$

Rozložení jasu této oblohy ve vztahu k průměrnému jasu oblohy L_m se stanoví podle vztahu

$$L_\gamma = \frac{3}{7} L_m (1 + 2 \sin \gamma) \quad (3)$$

Poměr jasu oblohy ve výšce úhlu γ nad horizontem k průměrnému jasu oblohy se vyjadřuje pomocí činitele jasu oblohy q

$$q = \frac{L_\gamma}{L_m} = \frac{3}{7} (1 + 2 \sin \gamma) \quad (4)$$



Obr. 1 – Rozložení jasu na rovnoměrně zatažené obloze při tmavém terénu od horizontu (0°) k zenitu (90°)
Pramen: ČSN 730580-1 Denní osvětlení budov – Část 1: Základní požadavky, příloha A

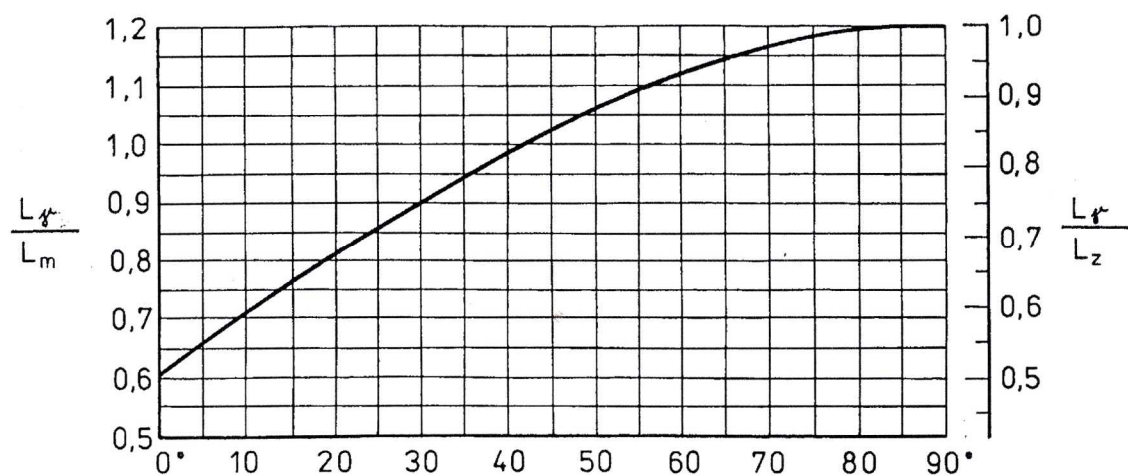
Při rovnoměrně zatažené obloze se zasněženým terénem se stanoví obdobné vztahy podle rovnic

$$L_{\gamma} = \frac{1}{2} L_z (1 + \sin \gamma) \quad (5)$$

$$L_m = \frac{5}{6} L_z \quad (6)$$

$$L_{\gamma} = \frac{3}{5} L_m (1 + \sin \gamma) \quad (7)$$

$$q = \frac{3}{5} (1 + \sin \gamma) \quad (8)$$



Obr. 2 – Rozložení jasu na rovnoměrně zatažené obloze při zasněženém terénu od horizontu (0°) k zenitu (90°)

Pramen: ČSN 730580-1 Denní osvětlení budov – Část 1: Základní požadavky, příloha A

Vstupní údaje pro výpočet denního osvětlení v interiéru jsou:

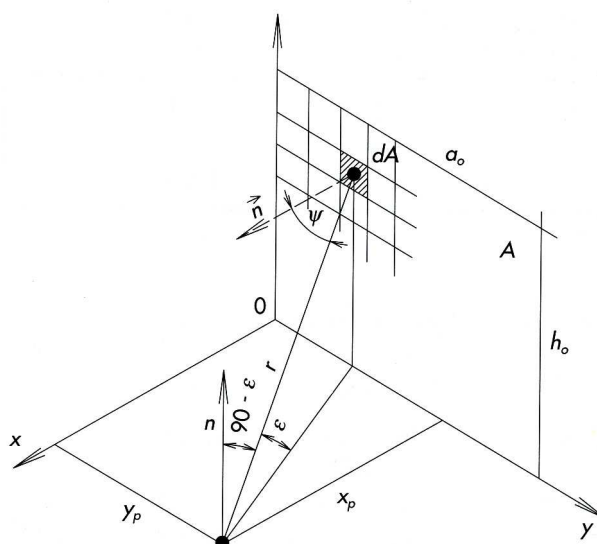
- jasová charakteristika oblohy, terénu a zastiňujících překážek;
- geometrické údaje o osvětlovaném prostoru a okolí;
- činitel odrazu světla hlavních ploch v interiéru;
- činitel průstupu a ztrát světla.

2.1.1. Bodové metody výpočtu činitele denní osvětlenosti

Základem bodových metod výpočtu činitele denní osvětlenosti je aplikace vztahu:

$$E = \int L_{\varepsilon} \cdot \cos(90 - \varepsilon) d\Omega \quad (9)$$

kde E je osvětlenost v bodě P dané roviny v lx;
 $d\Omega$ je elementární prostorový uhel plochy dA k bodu P v sr;
 L_{ε} je jas plošného elementu příslušného k $d\Omega$ v cd.m^{-2} ;
 $90 - \varepsilon$ je úhel dopadu světla na osvětlovanou plochu měřený od normály této plochy ve stupních.



Obr. 3 – Geometrické závislosti při výpočtu osvětlenosti od elementární plochy dA s jasnem L_{ε} v bodě P

Pramen: RYBÁŘ, Petr. Denní osvětlení a oslunění budov. 1. Vyd. Brno: ERA, 2001. 271 s. ISBN 80-86517-33-0

Na základě uvedeného vztahu bylo vytvořeno mnoho výpočetních metod, ve kterých je často integrace nahrazena grafickou sumací.

Pokud zdroj světla vzhledem ke svým rozměrům není možno považovat za bodový zdroj, je nutno jej rozdělit na menší části a každou uvažovat při výpočtu samostatně a výsledky sčítat. Zde existují tři různé principiální možnosti:

- **Analytická integrace:** je použitelná tehdy, pokud lze analyticky vyjádřit závislost svítivosti (jasu) plochy na umístění a existuje-li integrál takové funkce; takové analytické řešení je použitelné pouze v jednodušších případech, může však znamenat výrazné urychlení výpočtu

- **Numerická integrace:** spočívá v rozdělení počítané plochy na menší plošky splňující velikost podle uvažovaného dělicího poměru a dále součet příspěvků od jednotlivých plošek; v současné době rychlých počítačů se zdá být tato metoda velmi vhodná, umožňuje zejména podrobné řešení vnitřní i vnější odražené složky a respektování i složitých tvarů interiéru
- **Grafická integrace:** umožňuje vytvořit různé grafické pomůcky k rychlému odhadu či výpočtu; společným problémem grafických metod je zjednodušení při práci s ostěním osvětlovacího otvoru, prakticky jsou vhodné pouze pro tenká ostění

Nejčastěji u nás používané grafické metody:

- Daniljukovy diagramy,
- Protraktory podle Kittlera,
- Waldramův diagram.

Správné výsledky jsou dosahovány i jinými metodami výpočtu⁴.

Daniljukovy diagramy

Metoda je určena pro výpočet oblohové a venkovní odražené složky činitele denní osvětlenosti při libovolném sklonu osvětlovacího otvoru a libovolné poloze srovnávací roviny. Metoda je podrobněji popsána v literatuře⁵. Tato metoda je jediná z uvedených metod, která umožňuje výpočet na jiné než vodorovné rovině.

Podstata metody

Podle A. M. Daniljuka je oblohová hemisféra rozdělena systémem rovnoběžek a poledníků na 100 x 100 dílků tak, aby po průmětu do horizontální roviny měly stejnou plochu. Potom osvětlenost v kontrolním bodě bude od každého dílku stejná. Z kontrolního (výpočtového) bodu se promítá osvětlovací otvor na hemisféru, kde mu připadne určitý počet dílku. Pomocí diagramu pro řez místnosti se určí počet dílku pro svislý (poledníkový) rozměr otvoru a pomocí diagramu pro půdorys se určí počet dílků ve vodorovném směru (pro šířku otvoru). Sumací se stanoví osvětlenost od celého osvětlovacího otvoru.

Protraktory podle Kittlera

Metoda slouží pro určení oblohové složky nebo venkovní odražené složky činitele denní osvětlenosti v jednoduchých případech stínění. Podrobný popis metody je uveden v publikaci⁶.

Podstata metody

Protraktorem se určuje velikost oblohové složky činitele denní osvětlenosti v kontrolním bodě od nekonečně širokého osvětlovacího otvoru, která se následně koriguje podle jeho šířky. Protraktory byly odvozeny na základě podrobných analytických výpočtů. Nevyhnutelná zjednodušení při

⁴ Kittler, Kittlerová, 1975, Halahyja a kol., 1985, Kleissner, 1986

⁵ Kittler, Kittlerová, 1975, Halahyja a kol., 1985, Krtilová, Matoušek, Monzer, 1981

⁶ Kittler, Kittlerová, 1975

konstrukci nomogramů mohou být zdrojem nepřesnosti ve výsledcích, které jsou však z hlediska praktických požadavků na přesnost výpočtů bezvýznamné.

Diagram podle Waldrama

Grafická pomůcka pro určování oblohové a při zastínění osvětlovacího otvoru i venkovní odražené složky činitele denní osvětlenosti. Na rozdíl od ostatních popsaných bodových metod výpočtu Waldramův diagram poměrně přesně zohledňuje i složité obrysy venkovních překážek. Podrobnější popis obsahuje⁷.

Waldramův diagram⁸ platí jen pro osvětlovací $\tau_s = 1$ otvory s .

Podstata metody

Diagram představuje polovinu hemisféry rozdělenou pravoúhlou čtvercovou sítí na plošky, z nichž každá má hodnotu 0,1% D_{ob} . Vodorovné hrany se přenášejí do plných křivek, svislé hrany do svislic, hrany budov kolmé k rovině okna do čárkovaných čar. Pomocí elevačních a azimutálních úhlů se z kontrolního bodu promítne do diagramu osvětlovací otvor i s případnou zastíňující překážkou.

2.1.2 Tokové metody výpočtu činitele denní osvětlenosti

Tokové metody činitele denní osvětlenosti jsou založeny na vyhodnocení světelného toku prostupujícího osvětlovacími otvory a na určení jeho rozdělení na jednotlivé povrchy v místnosti. Výsledkem výpočtu je průměrná hodnota činitele denní osvětlenosti (celková hodnota nebo odražená složka) obvykle na vodorovné srovnávací rovině.

Při odvozování uvedených metod výpočtu se předpokládalo, že prostor je bez zařízení, které by omezovalo výměnu světla mezi jednotlivými povrchy osvětlovaného prostoru.

Výpočet vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti (podle B. R. S. a Kittlera)

Metoda je určena pro výpočet průměrné a minimální hodnoty vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti při jednostranném bočním osvětlení. V případě vícestranného osvětlení se výsledná hodnota určí jako součet hodnot vypočítaných pro jednostranné osvětlené prostory.

Podstata metody

Teoreticko-empirický vztah B. R. S. je založen na náhradě reálného prostoru prostorem kulového tvaru s rovnoměrně a rozptýlně odrazným povrchem, s činitelem odrazu X , ve kterém odraženou složkou osvětlenosti ρ můžeme vyjádřit jako součet nekonečné řady postupných odrazů světelného toku Φ .

⁷ Estimating Daylight in Buildings, 1969 – 1970

⁸ Halahyja, 1985

$$E = E_0 + E_i = \frac{\Phi}{S} + E_0 \quad (10)$$

kde Φ je prvotní (budící) světelný tok procházející osvětlovacím otvorem,
 S je vnitřní plocha kulového prostoru.

Rozdělením světla po prvním odrazu ($\Phi \cdot \rho$) na více členů se koriguje nerovnoměrnost rozložení činitele odrazu v reálném prostoru. Zavedením empirických konstant se koriguje vliv zastiňující překážky a terénu před oknem. Podrobný rozbor a další informace jsou uvedeny v pramenech⁹.

Taková účinnostní metoda výpočtu průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti při bočním osvětlení

Metoda je určena k výpočtu celkové průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti a průměrné hodnoty vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti v místnostech s jednostranným bočním osvětlením. V případě, že místnost je osvětlena okny s různými rozměry, případně umístěny v různé výšce, provádí se výpočet pro každý typ nebo umístění oken zvlášť a výsledná hodnota se stanoví jako součet hodnot dílčích řešení.

Podstata metody

Světelný tok procházející oknem do místnosti se rozdělí na části dopadající na tři rozhodující plochy osvětleného prostoru:

1. Fiktivní stropní rovinu,
2. Stěny mezi fiktivní stropní rovinou a srovnávací rovinou,
3. Srovnávací rovinou.

Aby se zjednodušilo určování přímého i odraženého světelného toku, přisoudí se fiktivní stropní rovině a srovnávací rovině činitelé odrazu stejní, jaké by měly jimi nahrazované prostory.

Tím vznikne zjednodušený prostor s činiteli odrazu ρ_{1f} , ρ_2 , ρ_{3f} a oknem, respektive okny na celou výšku boční stěny. V takovém prostoru je osvětlenost srovnávací roviny E_3 daná vztahem:

$$E_3 = E_{ob} + E_v + \rho_{1f} \cdot f_{1,3} \cdot E_1 + \rho_2 \cdot f_{2,3} \cdot E_2 \quad (11)$$

kde E_{ob} je osvětlenost srovnávací roviny oblohovým světlem v lx,
 E_e je osvětlenost srovnávací roviny vnějším odraženým světlem v lx,
 E_1, E_2 je výsledná průměrná osvětlenost fiktivní stropní roviny, stěn v lx,
 ρ_{1f}, ρ_2 jsou činitelé odrazu fiktivní stropní roviny, stěn,
 $f_{1,3}, f_{2,3}$ jsou činitelé vazby mezi fiktivní stropní rovinou, stěnami a srovnávací rovinou.

Podobné rovnice lze napsat pro osvětlenost fiktivní stropní roviny a stěn:

$$E_1 = E_{1e} + \rho_2 \cdot f_{2,1} \cdot E_2 + \rho_{3f} \cdot f_{3,1} \cdot E_3 \quad (12)$$

⁹ Kittler, Kittlerová, 1975

$$E_2 = E_{2e} + E_{2,ob} + \rho_1 \cdot f_{1,2} \cdot E_1 + \rho_2 \cdot f_{2,2} \cdot E_2 + \rho_3 \cdot f_{3,2} \cdot E_3 \quad (13)$$

Soustava rovnic (11), (12), (13) je řešitelná, umíme-li stanovit světelné toky procházející osvětlovacími otvory a dopadající na jednotlivé povrchy. Podrobné odvození rovnic je uvedeno v¹⁰.

Taková účinnostní metoda pro výpočet průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti při horním osvětlení

Metoda je určena pro výpočet průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti D_p (součet oblohové a odražené složky) a výpočet průměrné vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti $D_{i,p}$ v místnostech osvětlených zenitními, pilovými, lucernovými a lichoběžníkovými světlíky.

Podstata metody

Světelný tok dopadající z oblohy na osvětlovací otvor prostupuje výplní otvoru do osvětlovaného prostoru. V konstrukci osvětlovacího otvoru a jeho výplni dochází ke ztrátám světla. Podíl světelného toku prostoupeného konstrukcí osvětlovacího otvoru do osvětlovaného prostoru ku světelnému toku dopadajícímu na vstupní otvor osvětlovacího otvoru (bez vlivu výplně) se nazývá účinností konstrukce osvětlovacího otvoru η_0 . Účinnost konstrukce osvětlovacího otvoru zohledňuje též vliv sklonu zasklení a stínění vlastními stavebními konstrukcemi.

Světelný tok prostoupený do osvětlovaného prostoru dopadne přímo na srovnávací rovinu i ostatní povrchy místnosti. Následně dojde k mnohonásobnému odrazu toku mezi všemi povrchy v prostoru. Podíl světelného toku dopadajícího na srovnávací rovinu jak přímo, tak po mnohonásobném odrazu, a světelného toku vystupujícího z konstrukcí osvětlovacích otvorů do vnitřního prostoru má význam světelné účinnosti prostoru η_p .

Složka osvětlenosti na srovnávací rovině vzniklá odrazem má význam vnitřní odražené složky osvětlenosti, a je-li vyjádřena podílem se srovnávací osvětlenosti v procentech, pak má tato složka význam průměrné vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti $D_{i,p}$.

Podrobněji je metoda rozpracována v¹¹.

Rozložení vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti

Rozložení vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti v interiéru závisí na mnoha okolnostech. Významný vliv na rozložení D_i má rozložení přímé složky činitele denní osvětlenosti ($D_{ob} + D_e$) na jednotlivých plochách, nerovnoměrnost činitelů odrazů na vnitřních plochách, jas terénu a stínících překážek, tvar prostoru atd. Matematický popis poměrů je v reálném prostoru mimořádně složitý. Analytické řešení je zvládnutelné jen za pomoci výpočetní techniky¹².

¹⁰ Hraška, Rybár, 1987

¹¹ Rybár, Hykš, 1985

¹² Matoušek, 1988

Dále uvedený postup je založen na statistickém vyhodnocení údajů změřených na modelech interiérů. Korekční hodnoty a průběhy korekčních funkcí vznikly zprůměrováním mnoha naměřených hodnot. Vypočtené hodnoty se mohou v některých případech odchylovat od hodnot naměřených.

Přesnost, s jakou můžeme určit zde uvedeným postupem rozložení vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti, je nižší než přesnost výpočtu průměrné hodnoty vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti podle části *Toková účinnostní metoda výpočtu průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti při bočním osvětlení* a *Toková účinnostní metoda pro výpočet průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti při horním osvětlení*. Pokud je požadována vyšší spolehlivost výsledků, je třeba použít počítačové simulace světelného prostředí.

Určování jasu hlavních ploch v interiéru

Aby bylo možné posoudit poměr jasu v zorném poli požadovaný podle příslušných ustanovení normativních předpisů¹³ jako jeden z ukazatelů kvality světelného prostředí, musíme znát jas různých ploch v interiéru. Určování jasu naráží při praktickém výpočtu na značné problémy. Není dostatečně rozpracována teorie rozložení světla v prostoru s bočním i horním denním osvětlením. Přesnost určování činitelů odrazu v projektovém řešení je závislá na zkušenosti a odpovědnosti projektanta apod.

2.1.3 Empirické metody

Podstatou empirických metod je použití empirických nebo iteračních vzorců a korekcí na základě změřených skutečných stavů. Smyslem těchto metod je matematicky zjednodušit výpočet složitějšího fyzikálního jevu. S použitím rychlých počítačů jejich význam klesá. K empirickým metodám patří například:

Výpočet rozložení vnitřní odražené složky bočních soustav

Toto rozložení je závislé na řadě faktorů a tato metoda rozložení stanoví jako funkci tvaru místnosti a odrazností ploch; metoda předpokládá otvory v jedné ze stěn; jsou-li ve více stěnách, výsledky se sčítají. Metoda je použitelná pro jednoduché tvary místnosti a má řadu korekcí a okrajových podmínek.

Předběžný odhad denní osvětlení

Jedná se o tabulkovou metodu vytvořenou na základě zkušeností.

Korigovaná metoda B.R.S. tzv. Krochmann

Metoda je kompromisem mezi tokovou a empirickou.

¹³ ČSN 36 0020, ČSN 73 0580-1

2.2. Umělé osvětlení

Při návrhu a výpočtu umělého osvětlení je třeba vycházet z terminologií uváděných v příslušných normách¹⁴. Při odvozování světelně-technických parametrů osvětlovacích soustav se vychází ze dvou souhrnných kritérií charakterizujících úroveň vidění. Jedním je zrakový výkon a druhým zraková pohoda. Mezi hlavní parametry určující světelné prostředí patří:

- rozložení jasu,
- osvětlenost,
- oslnění,
- směrovost světla,
- podání barev a barevný tón světla,
- míhání světla,
- denní světlo.

Všechny uvedené parametry definuje norma ČSN EN 12 464-1.

Výpočtové metody pro výpočet umělého osvětlení lze rozdělit podle způsobu určení konečné hodnoty do následujících skupin:

- **Tokové metody** (pro určení osvětlenosti dané plochy)
- **Bodové metody** (pro určení osvětlenosti v daném bodě)
- **Statistické simulace světelného prostředí** (viz. kapitola 2.3.)

2.2.1. Výpočet osvětlovací soustavy tokovou metodou

Výpočet osvětlovací soustavy vnitřního osvětlení metodou poměrného příkonu

Tato metoda slouží k orientačnímu stanovení příkonu osvětlovací soustavy, který je potřebný k zajištění požadované průměrné hladiny osvětlenosti E_p srovnávací roviny daného vnitřního prostoru. Pro poměrný příkon vztažený na 1m² osvětlované plochy platí vztah:

$$p = \frac{P}{S} \quad [\text{W.m}^{-2}; \text{W,M}^2] \quad (14)$$

kde P je příkon osvětlovací soustavy
 S je půdorysná plocha osvětlovací soustavy

Poměrný příkon závisí na způsobu osvětlení, druhu a rozmístění svítidel, geometrických rozměrech a světelnětechnických vlastnostech osvětlovaného prostoru. K odhadu poměrného elektrického příkonu lze využít tabulky¹⁵.

¹⁴ ČSN EN 12464-1 Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory
 ČSN EN 12665 Světlo a osvětlení – Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení

¹⁵ SOKANSKÝ, Karel. Elektrické světlo a teplo. Ostrava: VŠB, 1990. 283 s. ISBN 80-7078-061-4

Celkový příkon osvětlovací soustavy se stanoví lineárním přepočtem pro žádanou osvětlenost E_p a skutečný měrný výkon η_z dle vztahu:

$$P = p \cdot S \cdot \frac{10}{\eta_z} \cdot \frac{E_p}{100} \quad [\text{W}; \text{W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{lx}] \quad (15)$$

Výpočet osvětlovací soustavy vnitřního osvětlení tokovou metodou dle ČSN 36 0450

Tato metoda je vhodná má-li osvětlovaný prostor pravidelný půdorys, odrážejí-li plochy vymezující prostor rovnoměrně rozptýlně světelný tok, jsou-li svítidla zavěšena ve stejné výšce a mají-li stejnou fotometrickou plochu svítivosti a není-li osvětlovaný prostor zastavěn zařizovacími předměty. Neplatí-li výše uvedené předpoklady, je výpočet zatížen chybou. Dle¹⁶ platí pro místně průměrnou a časově maximální (počáteční) osvětlenost E_{po} vztah:

$$E_{po} = \frac{\eta \cdot \Phi_c}{S} \quad [\text{lx}; -, 1 \text{m}, \text{m}^2] \quad (16)$$

kde Φ_c je úhrnný jmenovitý světelný tok všech zdrojů osvětlovací soustavy
 S je plocha místnosti
 η je činitel využití osvětlovací soustavy.

Místně průměrná a časově minimální osvětlenost E_{pk} se určí vztahem:

$$E_{pk} = E_{po} \cdot z \quad [\text{lx}; 1 \text{x}, -] \quad (17)$$

kde z je udržovací činitel (činitel údržby)

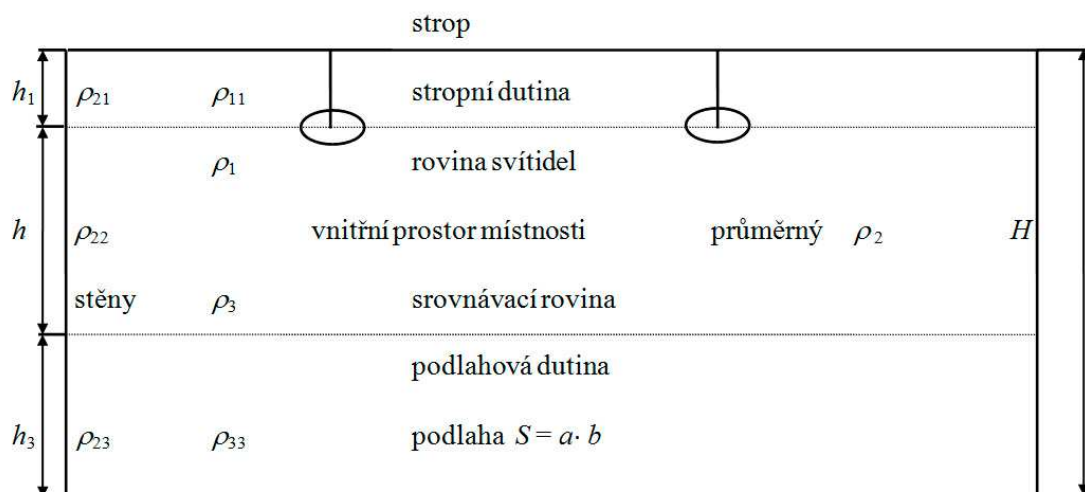
Potřebný počet svítidel n_s , potřebný pro dosažení požadované osvětlenosti E_{pk} se určí

$$n_s \geq \frac{E_{pk} \cdot S}{\eta \cdot z \cdot n_{zs} \cdot \Phi_z} \quad (18)$$

$$\Phi = n_s \cdot n_{sz} \cdot \Phi_z \quad (19)$$

kde E_{pk} místně průměrná a časově konečná osvětlenost srovnávací roviny
 S plocha srovnávací roviny
 η činitel využití osvětlovací soustavy
 z udržovací činitel (činitel údržby)
 n_{zs} počet světelných zdrojů ve svítidle
 Φ_z mjmenovitý světelný tok jednoho zdroje
 Φ celkový světelný tok

¹⁶ ČSN EN 12464-1 Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory



Obr. 4 - Toková metoda výpočtu osvětlenosti vnitřních prostorů

Pro činitel využití platí vztah:

$$\eta = \frac{\Phi_3}{\Phi_c} \quad (20)$$

kde Φ_3 je celkový světelný tok po mnohonásobných odrazech, dopadající na srov. rovinu.

Hodnoty činitele využití η jsou uvedeny v katalogových listech svítidel v závislosti na činiteli místnosti k a na ekvivalentních (fiktivních) činitelích odrazu roviny svítidel ρ_1 , stěn ρ_2 a srovnávací roviny ρ_3 .

Prostor nad svítidly (stropní dutina) a pod srovnávací rovinou (podlahová dutina) se nahrazuje fiktivními rovinami, rovinou svítidel a srovnávací rovinou, které mají stejné světelné odrazné vlastnosti jako dutiny, které nahrazují.

Určení činitele využití:

Činitel místnosti, stropní a podlahové dutiny:

$$k_i = \frac{5 \cdot h_i \cdot (a + b)}{a \cdot b} \quad \text{jen } k, h \text{ místnost, } i = 1 \text{ strop, } i = 3 \text{ podlaha} \quad (21)$$

Ekvivalentní činitele odrazu fiktivní roviny svítidel a srovnávací roviny:

$$\rho_i = \frac{1}{\frac{(1 + 0,4 \cdot k_i)^2}{\rho_{ii} + 0,4 \cdot k_i \cdot \rho_{2i}} - 0,4 \cdot k_i} \quad i = 1 \text{ strop, } i = 3 \text{ podlaha} \quad (22)$$

Činitel využití a činitele jasu (l_1 a l_2) se odečtou z katalogu svítidla pro hodnoty: k , $\rho_{1,2,3}$. Tabulky bývají uváděny pouze pro $\rho_3 = 20\%$ a pro jinou hodnotu činitele odrazu je třeba násobit tyto činitele opravným koeficientem.

Jas stropní dutiny a stěn:

$$L_i = l_i \cdot z \cdot \frac{\Phi}{S} \quad (23)$$

V případě, že jsou svítidla umístěna přímo na stropě daného prostoru, je výška stropní dutiny nulová a jas stropní dutiny, tj. jas fiktivní roviny proložené světelnými středy, je roven jas stropu.

Určení udržovacího činitele¹⁷:

$$z = z_Z \cdot z_S \cdot z_P \cdot z_{fz} \quad (24)$$

kde	z_Z	je stárnutí světelných zdrojů
	z_S	je znečištění svítidel
	z_P	je znečištění ploch osvětlovaného prostoru
	z_{fz}	je funkční spolehlivost světelných zdrojů

Způsob určení jednotlivých činitelů uvádí ČSN 36 0450 a je poměrně komplikovaný. Norma připouští minimální hodnotu $z = 0,5$.

2.2.2. Výpočet osvětlovací soustavy bodovou metodou

Všechny bodové metody jsou založeny na použití jednoduchého fyzikálního vztahu (viz. kapitola 2.1.2), zjednodušeně:

$$E = \frac{I}{l^2} \quad (25)$$

kde	I	je svítivost svítidla ve směru svítidlo bod [cd]
	l	je vzdálenost bodu od svítidla [m]
	E	místní osvětlenost v bodě ve směru spojnice svítidlo bod, neboli absolutní hodnota světelného vektoru [lx]

Bude-li nás zajímat horizontální složka, pak lze uvedený vzorec použít ve tvaru:

$$E = \frac{I}{l^2} \quad (26)$$

kde	α	je úhel mezi spojnici svítidlo – bod a vertikálou
-----	----------	---

Uvedený vzorec je přímo použitelný pouze pro bodové zdroje světla nebo pro takové dostatečně malé zdroje, které lze za bodové považovat. Pro zdroje, které pro své rozměry nelze považovat za bodové, existují dvě metody, které lze použít. Obě metody spočívají v rozdělení zdroje světla na menší části a liší se ve způsobu, jak to učinit.

¹⁷ podrobněji viz. kap. 2.4.2.

Numerická integrace neboli metoda dělení - metoda spočívá v rozdělení zdroje světla na dostatečně malé (elementární) části tak, aby je bylo možno považovat za bodové zdroje, podle normy ČSN 360450 lze za bodový zdroj považovat takový, jehož největší rozměr je minimálně 3x menší než vzdálenost od bodu výpočtu. V praxi je vhodnější použít hodnotu **vyšší (např. 5 až 10), tato hodnota je významná pro přesnost i délku výpočtu a nazývá se v praxi dělicím poměrem.**

Analytická integrace neboli integrální charakteristiky - metoda spočívá v analytické lineární nebo plošné integraci (analytickém součtu) dílčích příspěvků elementárních nekonečně malých částí svítidla. Aby bylo možno metodu použít, musí být známo analytické (funkční) vyjádření křivky svítidla a to takové, které lze integrovat, protože křivky svítivosti mají zcela obecné a rozličné tvary. Je třeba je nahradit (proložit) náhradními funkcemi. V praxi se s výhodou používá polynomu goniometrických funkcí. Těmito funkcím se po integraci říká integrální charakteristiky.

Obě metody používají jeden základní zjednodušující předpoklad - pokládají svítivost všech částí zdrojů světla za konstantní.

Metoda integrálních charakteristik:

- je poměrně rychlá, každé svítidlo se počítá pouze jedním, i když složitějším výpočetním cyklem

Metoda dělení:

- může používat přímo změřené snadno ověřitelné hodnoty svítivosti uvedené v katalogovém listu výrobce, nedefinované náhradními funkcemi
- je přesnější v případě překážek v místnosti, protože jednotlivé části svítidel mohou být vyhodnocovány samostatně
- je univerzální, nezávislá na rozměrech svítidla, jednodušší na zadání do databáze

Bodová metoda výpočtu osvětlenosti se v praxi používá zejména v těchto případech:

- výpočet přímé složky umělého osvětlení. Zdrojem světla je svítidlo v libovolné orientaci a vzdálenosti od bodu výpočtu. Charakteristiku svítivosti lze získat ze změřeného katalogového listu výrobce svítidla
- výpočet odražené složky bodovou metodou - zdrojem světla jsou odrazné plochy (stěny, strop, podlaha, předměty) osvětlovaného prostoru. Pro jednoduchost se nejčastěji uvažuje s tzv. difúzními plochami, tj. takovými, které mají kosinovou charakteristiku svítivosti definovanou vztahem $I = L \cdot \cos \varphi \cdot S$, v praxi se tomuto předpokladu dobře blíží matné plochy jako např. omítky, v případě lesklých ploch musíme počítat s chybou výpočtu. Existují dvě základní metody, jak lze vypočítat jas svítící plochy. První jej získá jako výsledek výše uvedené tokové metody. Logicky považuje jas celé plochy za konstantní a nelze počítat s jasy stínících předmětů. Druhou je dále popsána numerická metoda mnohonásobných odrazů.

Numerická metoda mnohonásobných odrazů - tato metoda se snaží přiblížit skutečnému fyzikálnímu ději je variantou výpočtu odražené složky. Metoda spočívá v tom, že po prvotním výpočtu přímé složky na elementárních částech odrazných ploch prostoru se ve zvoleném počtu výpočetních cyklů počítají kumulující se příspěvky jednotlivých částí odrazných ploch. Přesnost výpočtu záleží

jednak na tom, na jak malé elementární části se jednotlivé odrazné plochy dělí a pak také na zvoleném počtu cyklů. Podle zkušeností se ukazuje, že při třech cyklech je již dosahovaná chyba jen kolem jednoho procenta odražené složky.

2.3 Počítačové simulace světelného prostředí

Simulační metody jsou založeny na klasických optických, termodynamických, resp. světelnotechnických modelech šíření záření.

V podstatě existují dvě základní metody využívané při počítačových simulacích světelného prostředí – metoda Monte Carlo, ve které se aplikuje technika sledování paprsku (angl. – ray tracing, tento název se obvykle používá pro zpětné sledování paprsku, používá se také název vrhnutí paprsku – ray casting, v tomto případě paprsek vychází ze světelného zdroje), a radiační metoda (angl. – radiosity). Z fyzikálního hlediska jsou obě dvě metody podobné, rozdíl spočívá v algoritmizaci. V metodě sledování paprsku se pracuje s velmi malými ploškami stochastickým způsobem (výsledky opakovaného výpočtu se mohou mírně odlišovat). V radiační metodě se pracuje s většími plochami deterministicky (výsledky opakovaného výpočtu jsou vždy stejné).

2.3.1 Metoda Monte Carlo ve světelnotechnických výpočtech

V zařízených místnostech s povrchy, které mají různé optické vlastnosti, se s výhodou uplatňuje stochasticky (pravděpodobnostní) výpočet osvětlenosti, často označovaný jako metoda Monte Carlo. Obecně je tato metoda jednou z metod operačního výzkumu využívající simulování technických, ekonomických a společenských situací. Metoda pracuje s náhodnými čísly získanými např. generováním počítačem. Existuje větší počet variant metody Monte Carlo.

Principy

Tyto metody se při počítačových vizualizacích používají zejména kvůli všeobecnosti a možnosti regulovat přesnost a čas strojového výpočtu. Z počátku byly uvažovány jen odrazy světla zrcadlovým způsobem, později se uplatňovaly pravděpodobnostní výpočty i ostatních složek osvětlenosti. Obecně tyto metody používají velké množství náhodně vyslaných paprsků nebo částic nesoucích energii. Jejich pohyb v prostředí podléhá fyzikálním zákonům a sleduje se. Úplně přesný výpočet by se dal uskutečnit tehdy, pokud by se dala (dokázala) sledovat dráha každého fotonu, což je samozřejmě s mnoha důvodů nemožné. Jestliže se náhodně vyšle velký počet paprsků (částic), např. 50 milionů, bude výpočet osvětlenosti velmi dobře odpovídat i vysokým nárokům na přesnost. Pokud se sleduje šíření světla od světelných zdrojů do prostředí, obvykle mluvíme o metodě sledování částic (někdy též dávek světelné energie, svazku fotonů nebo jednoduše fotonů). Z hlediska počítačové grafiky je sledování paprsku ve směru od světelných zdrojů k oku pozorovatele nebo objektivu kamery (případně virtuálního filmu) nevýhodné. Mnoho paprsků se „ztratí“, aniž by se dostaly do oka pozorovatele scény. Proto se často používá metoda zpětného sledování paprsku, kterou se sledují dráhy paprsků ve směru od pozorovatele ke zdrojům světla. Tímto způsobem se v algoritmech zohledňují tyto částice (paprsky), které se nevýznamněji podílí na osvětlení scény viděné pozorovatelem. Při tomto způsobu výpočtu je osvětlenost určitého místa proporcionálně závislá na počtu částic světla, které ho zasáhly, a hustotě světelného toku neseného každou z těchto částic. Přesnost výpočtu je kontrolovatelná a závisí na počtu vyslaných paprsků a počtu sledovaných odrazů.

Pokud je počet vyslaných částic dostatečně velký, pak z hlediska přesnosti výpočtu nezáleží na tom, zda se použije algoritmus sledování částic nebo zpětného sledování jejich drah.

V metodě zpětného sledování paprsku ve směru od pozorovatele vyšle přes každý zobrazovaný bod na obrazovce (nazývaný pixel – novotvar z anglického názvu pro obrazový prvek „picture element“) virtuální paprsek světla a testuje se jeho průsečík se všemi objekty v daném prostoru. (I když se běžně mluví o zobrazovaném bodu na obrazovce, bodovém průsečíku apod., je nutno upozornit na to, že se vždy významově jedná o malé plošky). Zjistí se nejbližší průsečík, kterým je místo viditelné na „scéně“ (pokud jde o netransparentní povrch). Generují se další paprsky. Směrem ke světelným zdrojům se vysílají paprsky s cílem zjistit, zda je viditelné místo zastíněné některým objektem. Pokud je povrch objektu lesklý zrcadlový, vytvoří se zrcadlový obraz primárního paprsku. Je-li povrch transparentní, vytvoří se paprsky reprezentující lom i odraz světla podle optických vlastností transparentního materiálu. Pokud je povrch netransparentní, generují se paprsky (často více než 100, někdy jen jeden paprsek – v závislosti na konkrétním algoritmu) imitující odraz světla od daného povrchu. V jednodušších vizualizačních programech se počítá průměrná hodnota odraženého světla jen pomocí empirických vztahů¹⁸.

V případě, že je místo průsečíku primárního paprsku s určitým objektem v prostoru osvětlováno některým ze světelných zdrojů (nebo zrcadlovým odrazem od určitého materiálu), vypočítá se jeho osvětlenost (resp. jas). V počítačové grafice se pro tuto osvětlenost používá pojem přímá osvětlenost na rozdíl od celkové osvětlenosti obsahující příspěvek odraženého světla, která se v této vědní oblasti nazývá globální osvětlenost.

Pro každý sekundární paprsek se zjišťuje nejbližší průsečík a proces se opakuje, dokud paprsek neopustí prostor nebo množství světla (resp. jas), které imaginární paprsek reprezentuje, neklesne pod zvolenou hodnotu. V některých algoritmech se paprsek sleduje, dokud se nevrátí do oka virtuálního pozorovatele, nebo se uvažuje jen zadaný počet odrazů. Tímto způsobem se modeluje geometrie prostoru současně s jeho syntetickým (nejčastěji barevným) zobrazením. Existuje větší počet výpočtových algoritmů, z nichž některé se od popsaného způsobu výpočtu významně odlišují. Do paměti počítače se ukládají mapy přímé a celkové osvětlenosti, které se dále zpracovávají za účelem dosažení plynulých přechodů stínů, vystižení optických jevů (např. kaustické křivky vznikají odrazem přímého světla od lesklých oblých předmětů nebo jeho prostupem přes oblé transparentní materiály, úplný vnitřní odraz, který vzniká při určitém úhlu dopadu přímého světla na planoparalelní transparentní media) apod.

Výpočet přímé a nepřímé osvětlenosti

Poloha, druh, velikost a světelnotechnické vlastnosti světelných zdrojů a povrchů v prostoru jsou při počítačové simulaci světelného prostředí známy. Pomocí primárních paprsků se zjistí, jestli z jednotlivých průsečíků paprsků s povrchy jsou světelné zdroje viditelné. Na místech osvětlených přímo se vypočítá jejich přímá osvětlenost, resp. jas. Na místech, která jsou osvětlována jen částmi světelných zdrojů, vzniká částečné zastínění. Tento problém se v simulačních výpočtech řeší různými způsoby. Jednou z možností je vyslat z těchto míst paprsky náhodným způsobem ve směru světelnému zdroji, přičemž stínění těchto paprsků (resp. osvětlenost v místech jednotlivých průsečíků) budou úměrné stupni zastínění příslušných míst.

¹⁸ Littlefair, 1991

Primární osvětlené povrchy odráží světlo do okolí v závislosti na svých optických vlastnostech.

Tato rovnice se v počítačové grafice často nazývá Kajiyaova zobrazovací (renderovací) rovnice (Kajiya, 1986), která vyjadřuje vztah odrážené, resp. prostupující záři. Pro rovnici se používají i jiné názvy, např. rovnice globální osvětlenosti, rovnice vzájemné osvětlenosti apod. Řešení uvedené rovnice je obtížné, protože neznámá na levé straně je závislá na neznámém záření přicházejícím na elementární plošku ze všech směrů, které vystupuje v rovnici na pravé straně. Pro řešení rovnice tohoto typu se používají přibližné numerické výpočtové metody.

V simulačních programech globální osvětlenosti se obecně pracuje se zářivou energií a jejími zářivými jednotkami, které se pro oblast viditelného záření přepočítají na světelné jednotky.

2.3.2 Radiční metoda ve světelnětechnických výpočtech

Ve světelnětechnických výpočtech se tradičně používají deterministické, analytické výpočtové metody. Radiční metodu můžeme chápat jako určité zevšeobecnění metody sledování paprsků. V této metodě se předpokládá, že všechny plochy jsou ideální difuzními primárními nebo sekundárními světelnými zářiči nebo jsou kombinací uvedených typů zářičů. Výhodou této metody z hlediska vizualizace a algoritmizace je to, že osvětlenost povrchů se počítá nezávisle na směru pohledu na vizualizovanou scénu. Při změně směru pohledu není nutno osvětlenost povrchů znovu počítat jako v metodě sledování paprsku, což je výhodou zejména při animacích procházek v architektonickém prostředí.

Radiční metoda je detailně popsána v mnoha publikacích¹⁹, z hlediska její aplikace v počítačové grafice je možno doporučit zejména²⁰. Na tomto místě jsou uvedeny jen principy radiční metody. Předpokládáme energeticky uzavřený prostor, ve kterém se nachází jen ideálně difuzní neprůsvitné plochy. Množství záření, které opouští plošný element i pozůstává z množství energie, kterou daná plocha vyzařuje (pokud jde o zdroj záření), a ze záření, které se po dopadu z ostatních povrchů prostředí od plochy odráží.

2.3.3. Programy na simulace světelného osvětlení

Vizualizační programy s vyspělou simulací světelného prostředí se stávají standardní součástí programů počítačové grafiky.

Jestliže v 80. letech 20. stol. trval výpočet syntetického obrazu složitějšího prostoru i celé týdny, současné rychlé počítače vybavené zdokonalenými vizualizačními programy to zvládnou za několik minut. Úspěšně se zdokonalují i fotorealistické vizualizace pohybujících se scén.

Existuje však větší počet vizualizačních programů, ve kterých se světelnětechnické veličiny počítají na kvalitativní úrovni velmi dobře vyhovující požadavkům světelné techniky. Vývoj v oblasti

¹⁹ např. Hottel, 1979, Glúck, 1971

²⁰ Sillion, 1994

vizualizačních programů je velmi dynamický. Přehled software uvedený v Tab. 1 je z tohoto důvodu třeba považovat za orientační.

Mnohé komerční programy využívají kombinaci radiační metody a metody sledování paprsků, která byla navržena už v 80. letech 20. stol.²¹. Kombinované využívání obou metod výrazně překonává možnosti metod aplikovaných samostatně. Objevují se dokonce programy, ve kterých si uživatel zvolí výpočetní metodu, případně konkrétní případ přepočítá oběma způsoby a vybere si vhodnější zobrazení.

Název programu	Charakteristika programu
DIAL	3D vizualizační program pro návrh vnitřního i venkovního osvětlení. Spolupráce s CAD programy. URL: http://www.dialux.com
ReluxPro	3D vizualizační program pro návrh vnitřního i venkovního osvětlení založený na normách EN 12464, EN 1838, EN 13201, sportovišť a denního světla podle CIE. URL: http://www.relux.biz
Lightscape	3D fotorealistický vizualizační program pro návrh vnitřního i venkovního osvětlení. Přímá podpora AutoCAD, 3D Studio VIZ, 3D studio MAX. URL: http://www.lightscape.com
CADE lighting	Český program pro návrh umělého osvětlení. Pro venkovní i vnitřní. URL: http://www.enika.cz
DQL	Nejrůznější programy z dílny českého autora na výpočet osvětlení. URL: http://www.dql.cz

Tab. 1 - Stručný přehled programů pro simulaci světelného prostředí

²¹ Wallace, 1987, Cohen, 1988

2.4. Udržovací činitel

2.4.1. Činitelé způsobující změny v provozních parametrech osvětlovací soustavy

Během života osvětlovacích zařízení dochází v jejich parametrech ke změnám, jež mají zčásti vratnou charakteristiku a zčásti jsou fyzikálně chemické povahy s charakteristikou nevratnou.

Vratné činitele

- stárnutí světelných zdrojů
- funkční spolehlivost světelných zdrojů
- stárnutí svítidel
- stárnutí povrchu místnosti

Nevratné činitele

- stárnutí popř. tmavnutí materiálů
- provozní teplota
- provozní napětí
- provozní frekvence

Mezi vratné změny patří takové, které se mění v závislosti na vnějších podmínkách (teplotě, napětí, frekvenci aj.), nebo které mohou být obnoveny čištěním svítidel a obnovou povrchových úprav v osvětlovaném prostoru. Mezi nevratné změny patří stárnutí světelných zdrojů. Při dosažení určité limitní hodnoty činitele stárnutí je nezbytná výměna světelných zdrojů, protože jejich další činnost je již neekonomická. Přitom světelný zdroj se zdánlivě může zdát funkční, ale na jednotku produkce světelného množství se již spotřebuje hodně energie. Podobně určují ekonomickou dobu života svítidel nevratné změny na svítidlech. Při dosažení určitého znehodnocení svítidla nevratnými změnami již efekt čištění svítidla není dostatečně účinný. Nevratné změny na svítidlech jsou způsobeny změnami ve hmotách (povrchově i objemově). Dochází tím ke změnám světelných vlastností aktivních částí svítidel, k deformaci původní křivky svítivosti a zhoršení jejich provozní účinnosti. Změny na osvětlovacích zařízeních charakteru stárnutí a znečištění mají v čase exponenciální průběh s různou tendencí poklesu světelných parametrů.

Světelné zdroje

U světelných zdrojů se průběh stárnutí liší podle jejich druhu. Určité rozdíly jsou u i různých výkonových stupňů stejného druhu. Také výrobky různých firem mají určité odlišnosti. Některé firmy uvádějí na trh zdroje s pomalejším stárnutím a delším životem. Za hlavní měřítko stárnutí lze považovat spotřebu energie na jednotku vyzářeného světelného množství během jeho života, i způsob jejich provozování.

Svítidla

Odstranitelné i neodstranitelné změny na svítidlech jsou závislé na vlastnostech prostředí v okolí svítidel a na jejich materiálovém a konstrukčním provedení (antikorozi provedení, krytí, vybavení prachovými filtry atd.). Čím je prostředí obtížnější, tím je pokles světelných parametrů svítidla rychlejší.

V zavedené metodice se uvažuje u svítidel jen s odstranitelným znečištěním. Pomalejší, skrytější, ale neodstranitelné narušení svítidel se neposuzuje. To nutně zkresluje vyhodnocení provozních vlastností svítidel během jejich života a nepřipomíná, že mají svou ekonomickou provozní dobu života. Také čištění svítidel má svou problematickou stránku. Dosáhnout původních parametrů svítidla jeho čištěním není prakticky reálné. Ve svítidle i na jeho povrchu vždy zůstává část nečistot, které prostým okem nevnímáme. Na základě změřených údajů je efektivnost čištění svítidel ve střední

době jejich života cca 60 až 90 %. Běžné čištění nasucho musí být po několika opakováních nahrazeno čištěním namokro, má-li mít čištění potřebný efekt.

Prostředí

Vliv znečištění hlavních ploch osvětlovaného prostoru ovlivňuje především odraženou složku osvětlenosti a projevuje se snížením jejich jasu. Podstatným způsobem závisí činitel znehodnocení ploch osvětlovaného prostoru na velikosti přímých světelných toků ze svítidel na strop a stěny místnosti.

Vyhořívání světelných zdrojů

Dalším významným činitelem v životě osvětlovacích soustav je vyhořívání (úmrtnost) světelných zdrojů. Jde o náhlé selhání činnosti zdroje, případně jeho přechod k rušivému nestabilnímu chování. V počátečním stadiu provozu zdrojů (do cca 100 provozních hodin) se mohou projevit hrubé výrobní vady na výrobku, které znamenají rychlé vyřazení z provozu. Pak následuje klidné období provozního života s jen ojedinělými výpadky zdrojů. V závěru života zdrojů se jejich úmrtnost zvyšuje a teoreticky po vyhoření 50 % zdrojů jejich fyzický život končí. U nekvalitních výrobků je vyhořívání zdrojů rozloženo v poměrně širokém pásmu a vyžaduje náročnější údržbu.

2.4.2. Určení udržovacího činitele

Udržovací činitel z vychází z obecného předpokladu, že zahrnuje pouze údržbou ovlivnitelné činitele změn osvětlení a současně vyjadřuje záruku, že místě průměrná a časově minimální hodnota osvětlenosti nebude menší, než požadovaná hodnota E_{pk} , tj.

$$z = \frac{E_m}{E_{in}} < 1 \quad (27)$$

kde E_m je udržovaná osvětlenost
 E_{in} je počáteční hodnota osvětlenosti

Činitel z bývá obvykle v rozmezí hodnot 0,7 až 0,5. Hodnota činitele $z \geq 0,5$ je předepsána v ČSN EN 12464-1 pro vnitřní prostory, zatímco pro veřejné osvětlení ve venkovních prostorech se podle ČSN 36 0400 požaduje $z \geq 0,6$. Při snížení udržovacího činitele pod dovolenou mez, tj. $z(t) < z$, je třeba vykonat údržbu, má-li osvětlení splňovat minimální předepsané parametry.

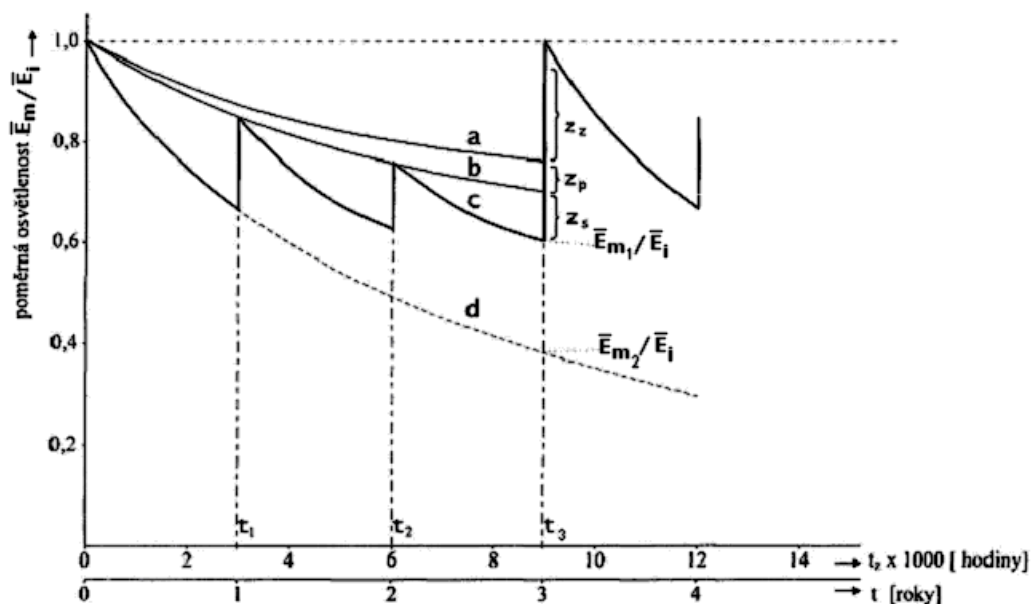
Udržovací činitel z se obvykle vyjadřuje jako součin souboru činitelů:

$$z = z_z \cdot z_s \cdot z_p \cdot z_{fz} \quad (28)$$

kde z_z je činitel stárnutí světelných zdrojů
 z_s je činitel stárnutí a znečištění svítidel
 z_p je činitel znečištění ploch osvětlovaného prostoru
 z_{fz} je činitel funkční spolehlivosti světelných zdrojů

Způsob určení jednotlivých činitelů uvádí ČSN EN 12464-1 a je poměrně komplikovaný. Norma, jak už bylo uvedeno dříve připouští minimální hodnotu $z = 0,5$.

Úkolem údržby osvětlení je zajistit takový průběh změn osvětlení, aby jak náklady na osvětlení, tak i náklady na údržbu zůstaly v přijatelných mezích. Tyto vztahy se zkoumají ekonomickou optimalizací dílčích intervalů údržby. Vliv jednotlivých činitelů na průběh a hospodárnost ukazuje Obr. 5 – Průběh průměrné osvětlenosti v závislosti na čase při provádění údržby Obr. 5.



Obr. 5 – Průběh průměrné osvětlenosti v závislosti na čase při provádění údržby

- t_1 doba čištění svítidel
- t_2 doba čištění svítidel
- t_3 hromadná výměna světelných zdrojů, čištění svítidel a obnova povrchových úprav místnosti
- t_z provozní doba (hodiny)
- t provozní doba (roky)
- a plocha nad křivkou a je úměrná ztrátám světla stárnutím světelných zdrojů
- $a - b$ plocha mezi křivkami a, b je úměrná ztrátám světla znečištěním plochy osvětlovaného prostoru
- $b - c$ plocha mezi křivkami b, c je úměrná ztrátám světla znečištěním svítidel
- $c - d$ plocha mezi křivkami c, d je úměrná přídatným ztrátám světla při zanedbávání čištění svítidel

3. Přehled světelných zdrojů a svítidel pro osvětlování průmyslových hal

3.1. Teoretický rozbor světelných zdrojů

Světelné zdroje, které přeměňují elektrickou energii v energii světelnou, jsou založeny na třech základních principech:

- Inkandescence (teplotní) – vyzařování světla vyvolané tepelným buzením
- Výbojové – vybuzení atomů plynu nebo par kovů v elektrickém a magnetickém poli
- Luminiscence

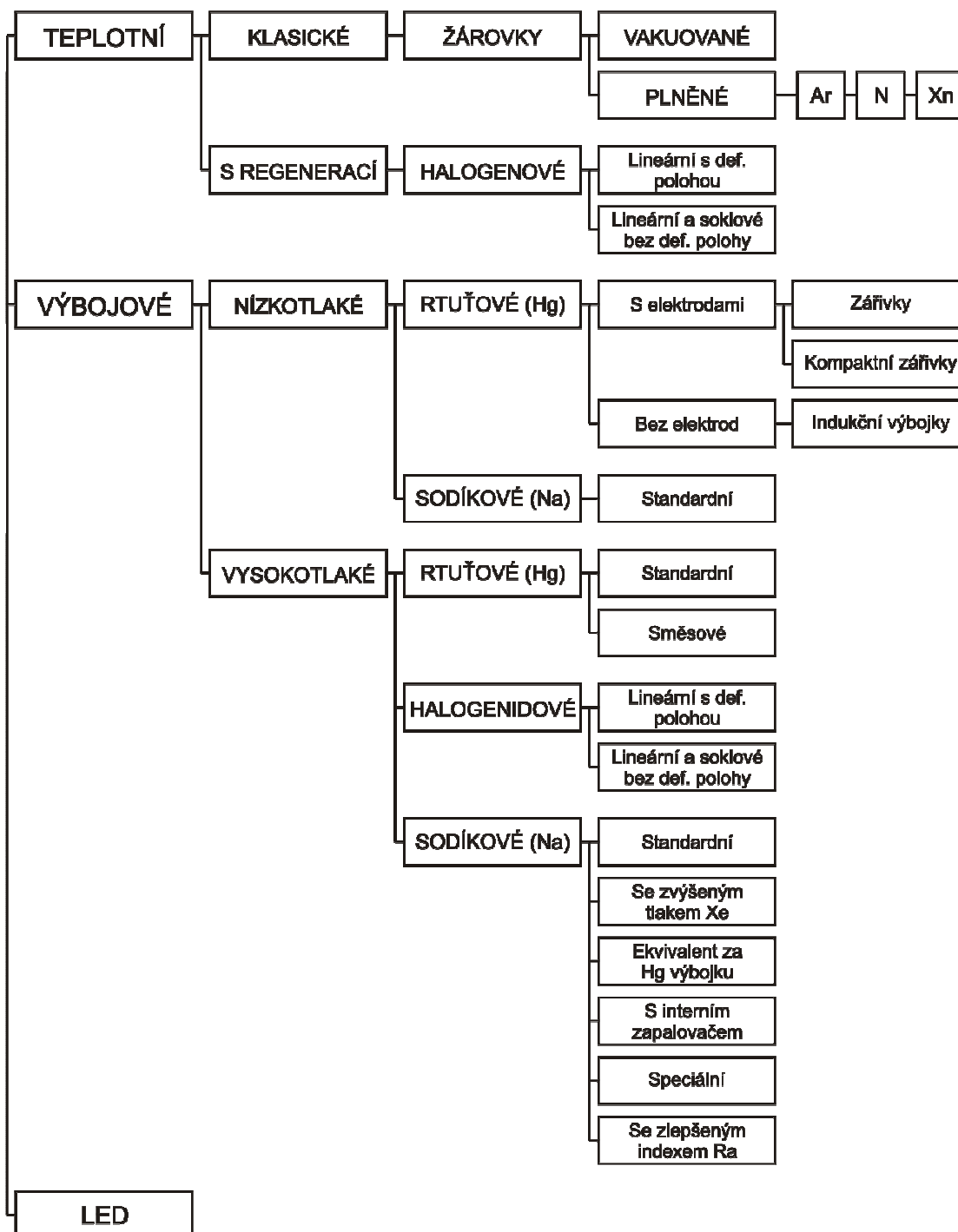
Lze konstatovat, že po dlouhou dobu se ryze nový fyzikální princip přeměny elektrické energie na energii světelnou nepodařilo objevit, a to i přes značné finanční prostředky, které jsou za tímto účelem vynakládány.

První způsob představuje klasický teplotní zdroj (žárovku). Průchodem elektrického proudu dochází k rozžhavení pevné látky na teplotu, při které dochází k emisi viditelného záření.

Druhý způsob představuje výbojový zdroj (rtuťová, halogenidová, sodíková výbojka), který pracuje na principu přeměny elektrické energie na kinetickou energii pohybujících se elektronů. Přitom dochází ke srážkám s molekulami plynné náplně nebo par kovů (sodík, rtuť). Důsledkem těchto srážek je emise optického záření.

Třetí způsob (luminiscence) je jev, při kterém hmota (luminofor) vysílá záření, jehož intenzita je větší než teplotní záření hmoty za stejné teploty (LED diody, lasery, kondenzátory). Tento kvantový princip vzniku světla spočívá ve vybuzení a následném „odbuzení“ atomů nebo molekul vhodných látek.

Existuje mnoho typů světelných zdrojů vzhledem k aplikačním sférám. Tu část, která se vyrábí ve velkých sériích a využívá komerčně nazýváme světelné zdroje pro všeobecné osvětlování. Schématické rozdělení takovýchto světelných zdrojů je na **Obr. 6**

Rozdělení světelných zdrojů pro všeobecné osvětlování²²

Obr. 6 - Schematické rozdělení světelných zdrojů pro všeobecné osvětlování

²² PLCH, Jiří. Světelná technika v praxi. Praha: IN-EL, 1999. 207 s. ISBN 80-86230-09-0

Souhrn funkčních vlastností světelných zdrojů

Při provozu světelného zdroje pro všeobecné osvětlování se v mnoha směrech opomíjejí skutečné funkční vlastnosti. Ty se u každého světelného zdroje skládají ze tří funkčních podskupin (částí), navzájem skloubených a neoddělitelných:

Světelně technické vlastnosti

- měrný výkon
- index barevného podání
- závislost parametrů na napětí
- tvar a velikost aktivní části
- pracovní poloha

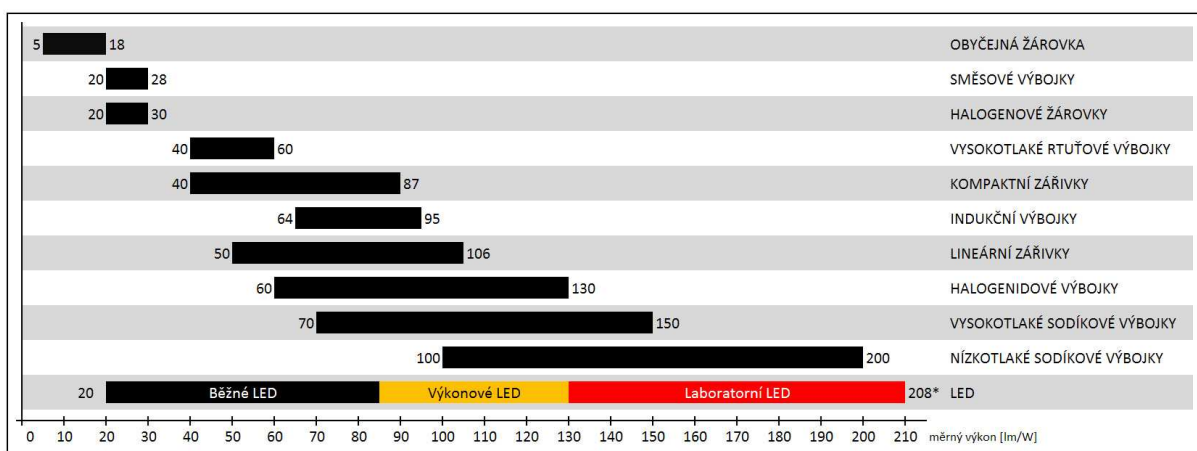
Elektrické vlastnosti

- provozní napětí zdroje
- připojení na napájecí soustavu
- typ regulace zdroje
- způsob jištění zdroje
- ostatní vlastnosti

Ekonomie provozu

- technický život zdroje
- světelný tok zdroje
- celkový příkon
- cena elektrické energie
- produkce Kč/Mlm.h

V současné době se stává základem výběru světelného zdroje měrný výkon určující kvantitativní přeměnu elektrické energie v energii světelnou ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$). Měrný výkon světelného zdroje je podíl vyzařovaného světelného toku (lm) a příkonu (W). Jde o jeden z nejdůležitějších ukazatelů jakosti světelného zdroje, který charakterizuje efektivnost přeměny energie elektrické na světelnou. Přehled o dosahovaných hodnotách měrných výkonů u hlavních skupin světelných zdrojů je na **Obr. 7**. Je třeba upozornit že u mnoha skupin dochází k neustálému vývoji a tím k zvyšování měrných výkonů. Nejbouřlivější rozvoj v současnosti zaznamenáváme u LED diod.



Obr. 7 – Měrné výkony jednotlivých skupin světelných zdrojů (stav 2009)

* společnost CREE 3.2.2010 oznámila dosažení měrného výkonu 208lm/W u bílé LED v laboratorních podmínkách

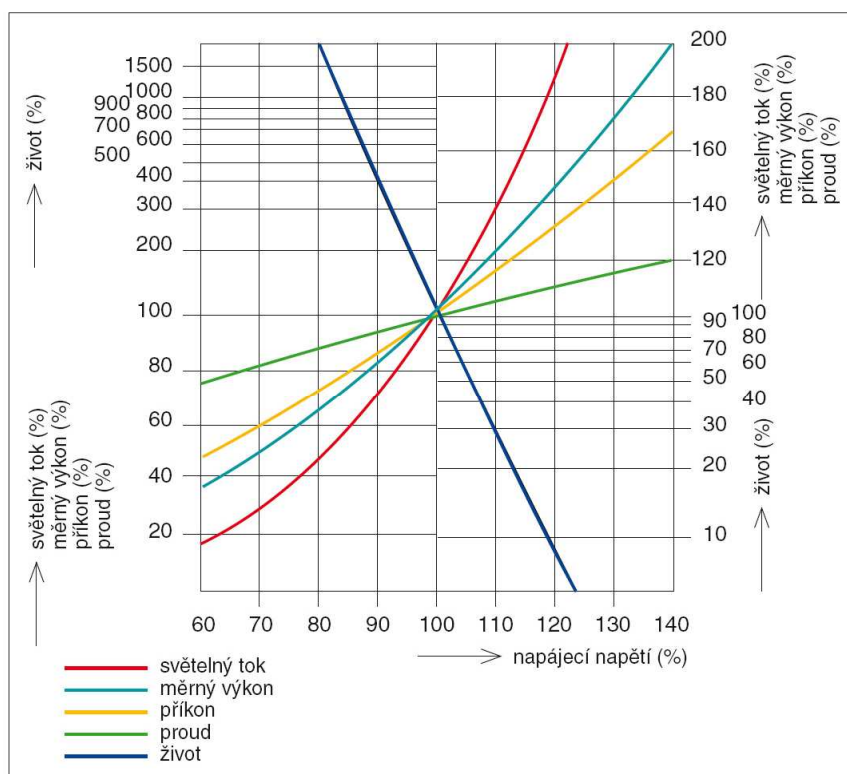
3.2. Charakteristika světelných zdrojů

Běžné žárovky

Jsou to nejpoužívanější, ale také nejméně hospodárné zdroje světla. Na světlo se přemění pouze 3 - 4 % vložené energie, zbytek jsou ztráty ve formě tepla. Jejich výhodou je nízká cena, jednoduché použití bez nutnosti instalace dalších přídatných zařízení. Výhodou žárovek je i příjemné barevné podání světla, které se blíží běžnému dennímu světlu, světlo má příjemný spojitý charakter.

Střední doba života žárovek je však poměrně krátká, nejčastěji 1000 hodin, při příkonech od 15 W do 200 W mají měrný výkon od 5 do 18 lm/W.

Mezi napájecím napětím a životem se v běžném rozsahu změn napětí projevuje výrazná exponenciální závislost. Vazbu mezi teplotou vlákna žárovky (resp. životem žárovky) a napájecím napětím je nutné mít vždy na zřeteli při výběru vhodného typu žárovky podle konkrétního napětí sítě²³.



Obr. 8 – Závislost základních parametrů žárovky na napájecím napětí

Světlo žárovek se může řídit nenákladnými stmívajícími zařízeními. Vzhledem k nízké teplotě chromatičnosti T_c a vysokému indexu barevného podání $R_a = 100$ jsou stále oblíbené a hojně využívané hlavně v domácnostech, ale i ve společenských prostorách. Žárovky se vyrábějí v širokém sortimentu výkonů, rozměrů a tvarů pro speciální úlohy osvětlení a zvláštní nároky. Nové tvary a barevné odstíny dávají bytovým a společenským prostorám příjemnou atmosféru.

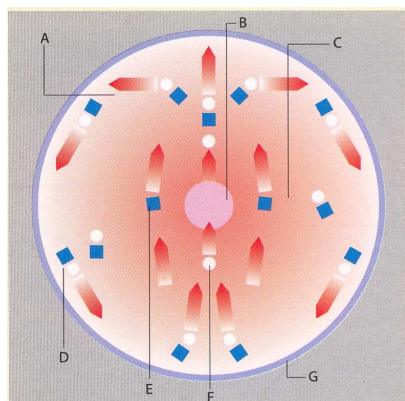
Halogenové žárovky

Halogenové žárovky jsou velmi kompaktní, z čehož vyplývají široké možnosti jejich použití, zejména v přesném směřování světelných paprsků, a proto se hodí pro osvětlování kanceláří a bytů.

Halogenové žárovky mají měrný výkon asi o 20 % vyšší než standardní žárovky. Ve standardní žárovce se wolfram z vlákna žárovky vypařuje a pokrývá povrch baňky, čímž se snižuje

²³ DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje – obyčejné žárovky. FCC Public, časopis SVĚTLO 2008/4

světelný tok žárovky. Kruhový proces uvnitř baňky způsobuje, že vypařený wolfram se při povrchu baňky slučuje s halogenem a vlivem tepelného pole se vrací zpět na nejteplejší místo vlákna, kde dochází k disociaci, tj. wolfram se usazuje zpět a halogen se vrací k povrchu baňky. Tím se nejen zvyšuje světelný tok, ale prodlužuje se také doba života halogenových žárovek.



A – Teplota pod 1400°C

B – Wolframové vlákno

C – Teplota nad 1400°C

D – Halid wolframu

E – Halogeny

F – Wolframové částice

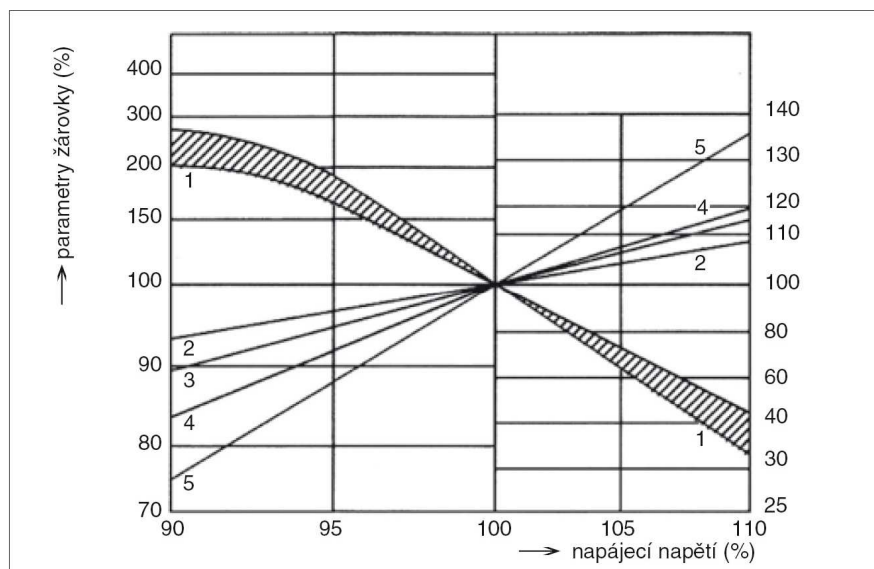
G – Skleněná baňka

Obr. 9 - Halogenová žárovka se znázorněním kruhového procesu ukládání wolframu zpět na vlákno

Kruhový proces je základem pro následující výrazné přednosti halogenových žárovek:

- s rostoucí teplotou vlákna roste i světelný tok,
- vlivem obnovy povrchu vlákna roste doba života,
- tím že nedochází k usazování wolframu na povrchu baňky, nedochází ani ke snižování světelného toku během doby života,
- kompaktní tvar, který odpovídá tepelným požadavkům kruhového procesu.

Stejně jako obyčejné žárovky, tak i u halogenových žárovek je silná závislost parametrů žárovky na napájecím napětí viz. **Obr. 10**



Obr. 10 - Závislost základních parametrů žárovky na napájecím napětí

Halogenové žárovky poskytují příjemné svěží, bílé světlo s teplotou chromatičnosti 3000 K. Index barevného podání světla halogenových žárovek je $R_a = 100$. Halogenové žárovky jsou hospodárnější než standardní žárovky, jejich měrný výkon je cca $25 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ a doba života se udává 2000 - 3000 hodin.

Halogenové žárovky se vyrábějí pro různé úhly vyzařování např. 10° , 12° , 25° , 36° a 60° . Vyrábějí se i v širokém sortimentu výkonů, na napětí 230 V i na nízké napětí. Žárovky na nízké napětí se staly módní záležitostí. Vyrábějí se buď bez odrazné plochy nebo s dichroickým zrcadlem, které omezuje tepelnou složku ve vyzařovaném záření asi na 66 %, což je výhodné zejména při osvětlování předmětů, které jsou citlivé na infračervené záření.

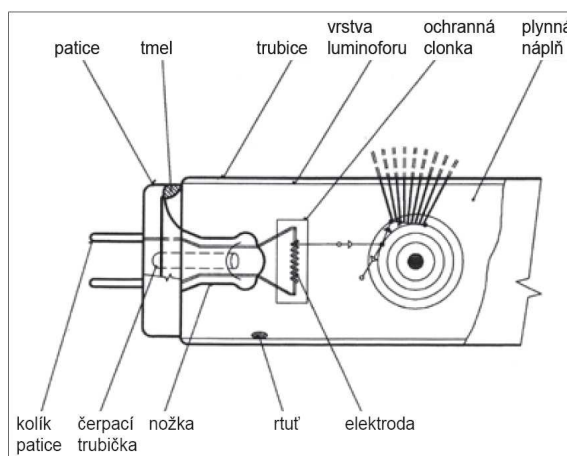
Moderní halogenové žárovky procházejí etapou bouřlivého vývoje. I v tomto případě se používají reflexní selektivní povrchy - multivrstvy pro zpětný odraz tepelného záření na vlákno, jehož cílem je zvýšení měrného výkonu halogenových žárovek. Z podobných důvodů je do baněk moderních halogenových žárovek dávkován i xenon. Do křemenného skla baňky se dotuje certit na potlačení UV záření. Stále více se také uplatňují moderní halogenové žárovky na síťové napětí, které se vyvinuly díky novým možnostem uchycení mnohem slabších vláken než se používají u halogenových žárovek na nízké napětí. Hitem posledních let jsou i nízkotlaké halogenové žárovky (nižší degradace wolframu) a také halogenové žárovky miniaturních rozměrů.

Nové halogenové žárovky se vyznačují následujícími přednostmi:

- mají až o 30 % vyšší měrný výkon,
- vyšší životnost,
- stabilitu světelného toku během celé životnosti,
- stabilitu teploty chromatičnosti,
- rovnoměrnější svítivost ve svazku v případě reflektorových halogenových žárovek,
- nižší podíl UV záření apod.

Lineární zářivky

Lineární zářivky vyrábějí okolo 70 % umělého světla na celém světě. Jsou velice výhodné zejména z ekonomického hlediska, protože se vyznačují vysokým měrným výkonem. Zářivka spotřebuje jen přibližně pětinu elektrického proudu než žárovka.



Obr. 11 – Konstrukce zářivky

Zářivky jsou nízkotlaké rtuťové výbojky, které vyzařují hlavně v oblasti ultrafialového záření. Toto se transformuje ve viditelné záření pomocí luminoforu. Princip funkce zářivek je následující. Ve skleněné trubici jsou vlivem elektrického pole mezi elektrodami vybudeny páry rtuti, ve kterých dochází k emisi neviditelného UV záření. Speciální látka - luminofor na vnitřním povrchu skleněné trubice přeměňuje neviditelné UV záření na viditelné světlo. Volbou luminoforu je možné ovlivnit barvu světla zářivky.

Standardní zářivky se širokopásmovými luminofory

Zářivka je nízkotlaká rtuťová výbojka se žhavenými elektrodami. Světlo vzniká působením ultrafialového záření na vrstvu luminoforu, který je zakotven na vnitřní straně trubice a vyzařuje viditelné světlo.

Obyčejné zářivky obsahují jednoduchý luminofor apatitového typu - halofosfát vápníku s aktivátorem. Tyto zářivky mají poměrně nedokonalé barevné podání světla - barva světla je studená bílá.

Trubicové zářivky se úzkopásmovými luminofory

Poměrem složek lze namíchat v podstatě jakoukoli barvu světla. U zářivek od teplé bílé do chladné bílé jsou luminofory jen dva. Zbytek - azurovou a modrou složku dodává druhé maximum vyzařování zeleného luminoforu a vlastní rtuťový výboj. Zářivky denní a speciální mají přidán ještě modře svítící luminofor. U některých typů nacházíme další barevné složky, ukazující na přidavek dalšího luminoforu. Použité luminofory jsou vysoce odolné proti účinkům krátkovlnného ultrafialového záření výboje, proto stárnou mnohem pomaleji než standardní zářivky. Jsou i průhlednější.

Třípásmové zářivky

Mají světelný tok o 75% vyšší ve srovnání se starými typy. Mají výborné barevné podání světla. Jejich světlo může mírně zvýrazňovat barvy. Mají vysoký světelný tok a dlouhou životnost až 18000 hodin. Využívají se v obchodních prostorách v kancelářích i domácnostech.

Nové typy zářivek T5 mají průměr trubice jen 16 mm, jsou o 50 mm kratší než standardní trubice T8 s průměrem 26 mm. Nabízejí vyšší měrný výkon až 106 lm.W^{-1} a jsou určeny pouze pro provoz s elektronickými předřadníky. Zářivky T5 dosahují úspor oproti zářivkám T8 v následujících oblastech:

- vyšší měrný výkon zářivek T5,
- vyšší účinnosti svítidel vlivem nižšího odstínění o 40 % štíhlejší zářivky,
- úsporným provozem s elektronickým předřadníkem,
- se systémem T5 je možné konstruovat štíhlejší svítidla, z čehož plynou další materiálové úspory.

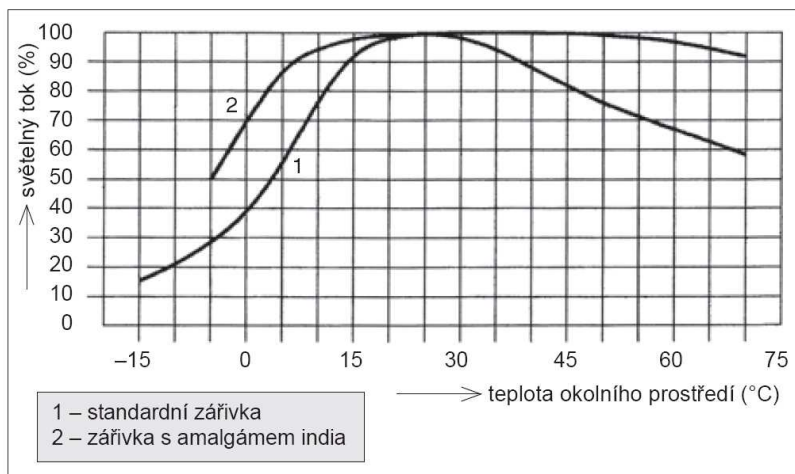
Nejkvalitnější zářivky

Mají vysokou intenzitu osvětlení a vynikající barevné podání srovnatelné s denním světlem. Dosahují barevné teploty 6500 K, což normovaná hodnota denního světla. Používají se tam, kde je potřeba kvalitní osvětlení, tam, kde je nutné přesně rozlišovat či porovnávat barvy např. laboratoře, textilní, tiskařský průmysl, atd. Používají se ve zdravotnictví, ve velkých nepřetržitých provozech. Charakter světla napomáhá relaxaci, odstranění depresivních stavů, používají se pro léčebné účely při fototerapii.

Jako všechny výbojky se ani zářivky neobejdou bez předřadných přístrojů. Po zapálení startérem je napětí na zářivce nižší než napájecí napětí. Na tlumivce se vytvoří úbytek napětí, který omezí proud tekoucí zářivkou. Zářivky lze také provozovat s elektronickými předřadníky. Moderní plně elektronické vysokofrekvenční předřadníky nahrazují tlumivky a startéry a přispívají tak k větší hospodárnosti, vyššímu světelnému komfortu a delší době života zářivek. Doba života zářivek je silně ovlivněna počtem zapnutí. Nehodí se proto tam, kde dochází k častému zapínání a vypínání.

Podle způsobu provozu se mění i doba života zářivek. Při provozu s klasickým předřadníkem se doba života zářivky pohybuje okolo 10 000 h zatímco při provozu s elektronickým předřadníkem se pohybuje okolo 18 000h.

Na rozdíl od žárovek, u kterých světelný tok dosahuje jmenovité hodnoty téměř okamžitě, zářivky dosahují jmenovité hodnoty až po cca 3 min. provozu. Zářivky jsou také velmi teplotně závislé viz **Obr. 12** a proto se nehodí pro osvětlování venkovních prostorů, ve kterých dochází k poklesům teplot do oblasti bodu mrazu a níže.



Obr. 12 – Závislost světelného toku zářivky na teplotě okolního prostředí

Kompaktní zářivky

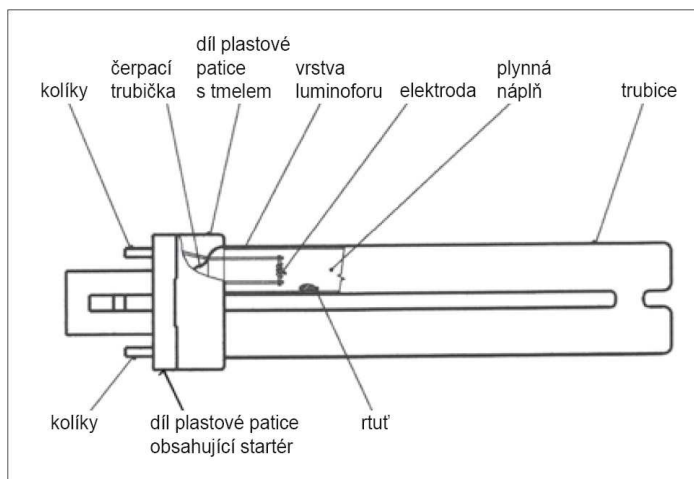
Tyto světelné zdroje v sobě skrývají čtyři základní výhody:

- produkují světelný tok s vysokým indexem podání barev,
- ve srovnání s žárovkami dosahují výrazné úspory energie,
- dobře vypadají,
- ve srovnání s žárovkami mají výrazně vyšší dobu života.

Kompaktní zářivky spotřebovávají výrazně méně elektrické energie než klasické žárovky, mají mnohem delší dobu života a většinou mohou být použity na stejných místech jako obyčejné žárovky, jsou kompaktní. Měrný výkon kompaktních zářivek je v porovnání s běžnými typy žárovek přibližně pětinašobně vyšší. Současně dosahovaná střední doba života zářivek je 15 000 hodin, zatímco střední doba života žárovek je 1000 hodin.

Výraznou nevýhodou kompaktních zářivek v porovnání s žárovkami, je rychlost jejich startu. Zatímco žárovky nabíhají na jmenovitý světelný tok téměř okamžitě, kompaktní zářivky po připojení

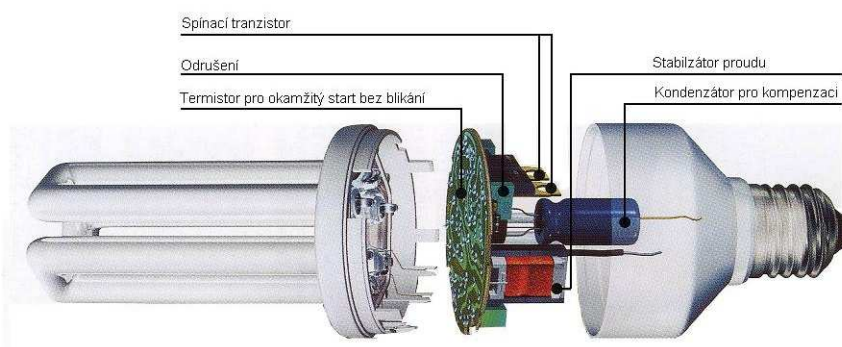
napájecího napětí naběhnou pouze na cca 50 % světelného toku. To ukazuje na nevhodnost použití kompaktních zářivek v prostorech, ve kterých je nutné dosáhnout okamžitě 100 % světelného toku (např. sociální zařízení).



Obr. 13 – Konstrukce kompaktní zářivky se zabudovaným doutňákovým startérem a paticí G24-d²⁴

Kompaktní zářivky můžeme rozdělit do tří skupin:

- kompaktní zářivky s implementovaným předřadníkem jako úsporná alternativa žárovek (viz. **Obr. 14**),
- kompaktní zářivky pro zvlášť malá svítidla,
- kompaktní zářivky jako zmenšená alternativa lineárních zářivek.



Obr. 14 - Konstrukce kompaktní zářivky s implementovaným elektronickým předřadníkem

Provoz s kompaktních zářivek s elektronickým předřadníkem zabezpečuje vysoký komfort:

- okamžitý start bez blikání,
- odolnost proti častému spínání,
- delší doba života,
- odstranění stroboskopického efektu a kmitání světelného toku.

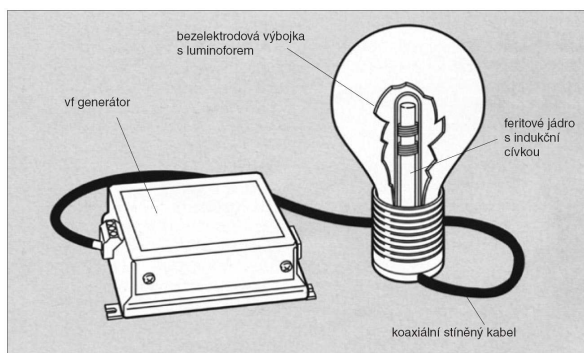
²⁴ DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje – kompaktní zářivky. FCC Public, časopis SVĚTLO 2008/3

Indukční výbojky

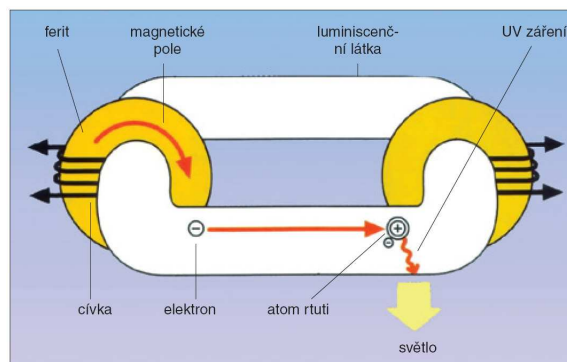
Zcela novou kategorii světelných zdrojů představují indukční výbojky, v nichž je výboj buzen vnějším vysokofrekvenčním polem. Charakteristickou zvláštností této skupiny je bezelektrobová konstrukce prostoru, v němž probíhá výboj. To vede k významnému technologickému zjednodušení výroby vlastní výbojky a současně umožňuje zlepšit její provozní parametry, protože výbojka obsahuje menší počet konstrukčních prvků, s nimiž může reagovat vnitřní náplň. Technicky složitější je zajištění příslušného napájecího zdroje, jehož technická úroveň, spolehlivost, život a cena zásadně ovlivňují zavádění indukčních výbojek do osvětlovací praxe.

Přestože se na principu vysokofrekvenčního buzení výbojek v bezelektrobovém prostoru pracuje v laboratořích světových firem celá desetiletí a první taková výbojka pod názvem Everlight byla vyvinuta v Japonsku již na konci 80. let dvacátého století, výbojku použitelnou v praxi se podařilo uvést na trh teprve v roce 1991 pod označením QL (Philips). V současné době již existují řady typů těchto světelných zdrojů, lišících se druhem svítících prvků a tlakem jejich par, mechanismem buzení výboje, budícím kmitočtem napájecího obvodu, konstrukčním uspořádáním vlastního výbojového prostoru, a tedy i výslednými světelnotechnickými, elektrickými a provozními parametry.

Do okruhu nízkotlakých indukčních výbojových zdrojů tedy patří již vzpomínané výbojky QL firmy Philips (viz. Obr. 15), výbojky Genura firmy General Electric (u obou firem jde o provedení s vnitřní indukční cívkou) a výbojky Endura firmy Osram (provedení s vnějšími indukčními cívkami) viz. Obr. 16.



Obr. 15 – Konstrukce indukční výbojky QL



Obr. 16 – konstrukce indukční výbojky ENDURA

Od těchto typů byly odvozeny výrobky dalších firem, zejména z asijských zemí, které ve skutečnosti kopírují základní principy uvedených výrobců a liší se pouze geometrickými parametry výbojové trubice a budícího zdroje a rozšiřují příkonové řady o další typy. Společným konstrukčním prvkem nízkotlakých indukčních výbojek je náplň výbojové trubice.

Celkově lze přednosti nízkotlakých indukčních rtuťových výbojek shrnout do těchto bodů:

- spojení velmi dobrých vlastností moderních lineárních zářivek provozovaných na vysoké frekvenci (zraková pohoda, velký měrný výkon blížící se hodnotě 100 lm/W, při velmi dobrém podání barev s $R_a > 80$) s kompaktními rozměry při větších příkonech,
- velmi dlouhý život, řádově desítky tisíc hodin (někteří výrobci uvádějí až 100 tisíc hodin),
- okamžitý start i znovuzápal,
- dobrá stabilita světelného toku v průběhu života,
- malý vliv kolísání napájecího napětí na světelný tok,

- díky oddělené konstrukci vlastní výbojky a zdroje (u vyšších příkonů) široké možnosti pro konstruktéry svítidel při navrhování nových svítidel.

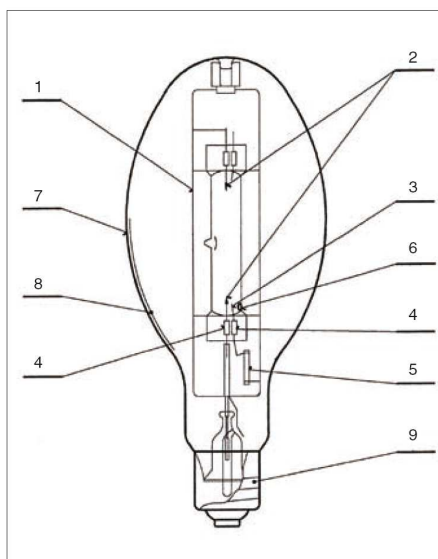
K nedostatkům patří:

- omezení příkonu směrem k vyšším hodnotám, vyplývající z principu nízkotlakého rtuťového výboje s luminoforem, kde zvýšení světelného toku je podmíněno zvětšením plochy pokryté luminoforem, a tedy i zvětšením rozměrů výbojky; příkon dosud nejvýkonnější výbojky je 400 W,
- v současné době – až na výjimky – nejsou stmívatelné,
- monopolní výrobci jednotlivých typů výbojek, s tím související zatím neunifikovaný sortiment výbojek, a tedy i omezený výběr svítidel,
- vysoká cena kompletu svítidlo + výbojka.

Uvedené parametry indukčních výbojek určují oblasti jejich použití, a to jak ve venkovních, tak i ve vnitřních osvětlovacích soustavách. Extrémně dlouhý život je výhodný zejména v provozech s obtížným přístupem ke svítidlům anebo v místech, kde obsluha osvětlení vyžaduje nežádoucí přerušování provozu (např. v silničních tunelech, osvětlení dopravních značek, ve výrobních halách s rozměrným výrobním zařízením apod.), protože umožňuje prodloužit intervaly výměny světelných zdrojů a výrazně snižuje náklady na údržbu.

Vysokotlaké rtuťové výbojky

Vysokotlaké rtuťové výbojky jsou světelné zdroje, v nichž hlavní část světla vzniká ve rtuťovém výboji při parciálním tlaku převyšujícím 100 kPa. Tato definice se vztahuje na výbojky s čirou vnější baňkou i s baňkou pokrytou luminoforem, v nichž část světla vzniká ve výboji a část ve vrstvě luminoforu vybuzeného ultrafialovým zářením výboje.



Obr. 17 – Konstrukce vysokotlaké rtuťové výbojky

1 – nosný rámeček, 2 – hlavní elektrody, 3 – pomocná elektroda, 4 – molybdenová fólie, 5 – rezistor, 6 – rtuť, 7 – vnější baňka, 8 – vrstva luminoforu, 9 – patice

Konstrukce rtuťové výbojky je naznačena na **Obr. 17**. Změněné podmínky výboje v porovnání se zářivkami, tj. podstatně vyšší pracovní tlaky a teploty a odtud vyplývající jiné geometrické a elektrické parametry, si vynutily i použití podstatně odolnějších materiálů na výrobu vlastní výbojové trubice – hořáku. Hořák je zhotoven z křemenného skla, do něhož jsou zataveny hlavní wolframové elektrody a zpravidla jedna pomocná elektroda. Na vakuově těsný zátav elektrod je využita molybdenová fólie. Elektroda je pokryta emisní hmotou na bázi oxidů barya a vápníku s přísadou oxidu yttritého, u starších konstrukcí s oxidem thoričitým. Do hořáku se dává přesné množství rtuti a argon o tlaku asi 2,6 kPa. Argon usnadňuje zapálení výboje a zabraňuje zvýšenému odpařování emisní hmoty v počáteční fázi jeho rozvinutí, kdy hořákem prochází (při nízkém tlaku rtuťových par) proud převyšující jmenovitou hodnotu až o 50 %.

Postupné vypařování rtuti v první fázi svícení výbojky po zapnutí má za následek odpovídající změny elektrických a světelných parametrů, takže ustálených hodnot se dosáhne po uplynutí asi 5 minut.

Vysokotlaké rtuťové výbojky vyžadují pro svůj provoz tlumivky, jejichž spotřeba činí přibližně 10 až 45 W podle příkonu.

K výhodám vysokotlakých rtuťových výbojek patří:

- dlouhý život 12 000 až 16 000 h; přední výrobci zdůrazňují u vybraných typů nízký podíl vadných zdrojů po deklarovaném životě (max. 10 % vadných), což usnadňuje obsluhu a údržbu osvětlovacích zařízení a umožňuje využívat skupinovou výměnu zdrojů,
- dobrá stabilita světelného toku v průběhu života – úbytek 20 % počáteční hodnoty (opět u výbojek od vybraných výrobců),
- libovolná poloha svícení,
- dobrá spolehlivost, daná jednoduchým schématem zapojení – pouze tlumivka bez zapalovače; z toho rovněž vyplývá jednodušší údržba osvětlovacích soustav,
- malý vliv okolní teploty na parametry výbojky,
- spolehlivý provoz i při nízkých teplotách (až do $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$),
- nízká cena, vyplývající z vysokého stupně automatizace výroby a z jednodušší technologie výroby.

Nevýhody:

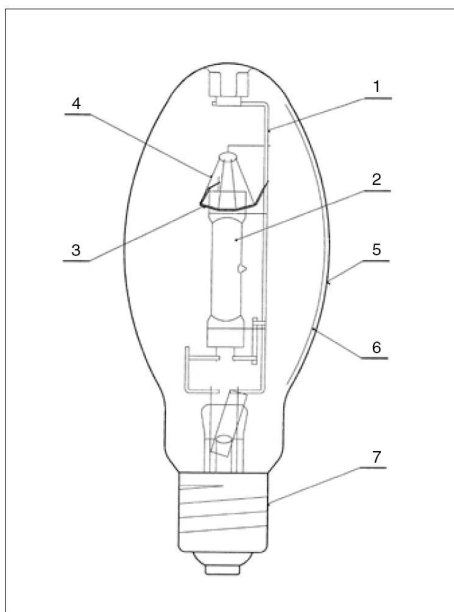
- poměrně malá účinnost v porovnání s moderními výbojovými zdroji, především u výbojek s malými příkony,
- horší podání barev, zejména u základního sortimentu,
- nemožnost – s ohledem na obsah rtuti – odkládat vyhořelé výbojky do komunálního odpadu,
- možnost výbojku po vypnutí zapnout až po jejím vychladnutí,
- materiálová náročnost, související s poměrně velkými rozměry svítícího povrchu výbojky,
- nevhodnost pro stmívání.

Podíl vysokotlakých rtuťových výbojek určených pro všeobecné osvětlení na trhu soustavně klesá a jsou postupně nahrazovány podstatně úspornějšími sodíkovými a halogenidovými výbojkami. Typům s nižšími příkony úspěšně konkurují i kompaktní zářivky s elektronickým předřadníkem a v současné době již i světelné diody. Rovněž vývoj nových vhodných svítidel stagnuje a předřadné obvody jsou zastoupeny pouze energeticky nevýhodnými tlumivkami, jejichž výroba v některých zemích bude právě z energetických důvodů ukončena. Vysokotlaké rtuťové výbojky se používají k venkovnímu osvětlení, osvětlení některých méně významných komunikací, dopravních značek, zvýšený podíl zeleného světla je činí vhodnými při osvětlení parkových ploch. V nových osvětlovacích soustavách jejich používání není žádoucí, a dokonce lze předpokládat – zejména ve vyspělých zemích – jejich omezení i legislativní cestou.

Směšové výbojky

Směšová výbojka je světelný zdroj, v jehož baňce jsou rtuťová výbojka a žárovkové vlákno zapojeny do série. Záření vlákna doplňuje spektrum rtuťového výboje zejména v červené oblasti, kde záření rtuti chybí. Konstrukce směšové výbojky je znázorněna na **Obr. 18**. Do série s křemenným hořákem vysokotlaké rtuťové výbojky je zapojeno wolframové vlákno, které současně plní i funkci předřadníku, takže není nutné používat tlumivku. Hořák, jehož konstrukce je obdobná jako u klasických vysokotlakých výbojek, i vlákno jsou namontovány do společné baňky s běžnou závitovou patičí. Baňka z měkkého skla je pokryta luminoforem (používá se vanadičnan yttritý aktivovaný

europiem) a je plněna inertním plynem. Směšové výbojky s příkonem 160 W jsou k dispozici i ve verzi s reflektorovou baňkou. Výbojky jsou vyráběny na napájecí napětí 225 až 235 V.



Obr. 18 - Konstrukce směšové výbojky
1 – nosný rámeček, 2 – rtuťový hořák, 3 – wolframové vlákno, 4 – molybdenové háčky, 5 – vnější baňka, 6 – vrstva luminoforu, 7 - patice

Výhody

- jednoduchý provoz nevyžadující použití předřadných zařízení,
- výhodná náhrada žárovek s velkým příkonem 200, 300 a 500 W, při delším životě; v těchto případech se spoří elektrická energie, resp. roste osvětlenost na pracovní ploše,
- příjemný teplý odstín světla s teplotou $T_{cp} = 3\,300$ až $3\,800$ K,
* dobré podání barev charakterizované $R_a = 60$ až 72 ,
- $\cos \varphi \sim 1$,
- téměř okamžité dosažení jmenovité hodnoty světelného toku.

Nevýhody

- nízký měrný výkon, který značně omezuje oblast použití,
- nemožnost je stmívat.

Používají se k osvětlování interiérů, do průmyslu, atd. Podíl směšových výbojek v celkové spotřebě světelných zdrojů trvale klesá, v nových osvětlovacích soustavách nemají své opodstatnění

Halogenidové výbojky

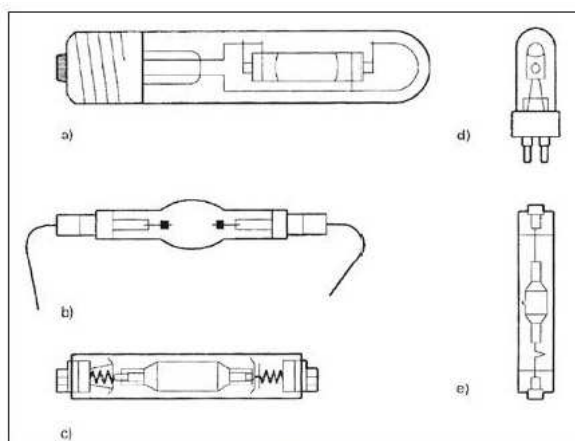
Halogenidové výbojky jsou vysokotlaké rtuťové výbojky, u nichž vzniká viditelné záření nejen v parách rtuti, ale také převážně zářením produktů vzniklých při štěpení halogenidů. Pro provoz halogenidových výbojek je nutné, stejně jako u zářivek, použití předřadných přístrojů, tzn. tlumivek a zapalovačů.

Halogenidové výbojky lze z hlediska materiálu použitého na zhotovení vlastního hořáku rozdělit do dvou základních skupin: výbojky s křemenným hořákem a výbojky s keramickým hořákem.

Halogenidové výbojky s křemenným hořákem

Halogenidové výbojky s křemenným hořákem jsou z hlediska konstrukce příbuzné rtuťovým výbojkám. Některé konstrukční odlišnosti vyplývají z přítomnosti halogenidů v hořáku. Vlastní výbojová trubice je zhotovena ze speciálního druhu křemenného skla, vyznačujícího se velmi malým obsahem skupin OH (nižší než 1 ppm). Do hořáku jsou s využitím molybdenových fólií zataveny hlavní wolframové elektrody pokryté emisní hmotou na bázi oxidu yttritického nebo thoričitého, popř. jsou zhotoveny z thoriovaného wolframu. Přítomnost halogenidů vylučuje použití emisní hmoty využívané ve rtuťových výbojkách. Do hořáku se kromě rtuti a příslušných halogenidů plní inertní plyn (obvykle argon nebo směs neonu a argonu), který má stejnou funkci jako u rtuťových výbojek. V

některých typech těchto halogenidových výbojek, kde je důležité co nejvíce zkrátit dobu náběhu (např. ve světlometech automobilů), se používá ještě xenon. Teplota částí hořáku za elektrodou, která ovlivňuje tlak, a tedy i výsledné světelné a elektrické parametry výbojky, se stabilizuje vrstvou např. oxidu zirkoničitého. Hořák je zataven do vnější baňky, která je buď vakuovaná anebo naplněná inertním plynem. Baňky výbojek malých příkonů jsou zhotoveny z měkkého skla, u vyšších příkonů (150 W a výše) z tvrdé skloviny. Jsou většinou válcové, čiré, u některých typů výbojek se používají eliptické, jež jsou pokryty luminoforem nebo rozptýlnou vrstvou. Výbojky jsou opatřeny buď závitovou, nebo bajonetovou patičí, anebo patičí s kontaktními kolíky. U některých typů výbojek zvláště malých rozměrů se používá baňka z křemenného skla. Konstrukce základních typů halogenidových výbojek s křemenným hořákem je schematicky zobrazena na Obr. 19²⁵.



Obr. 19 - Konstrukce základních typů halogenidových výbojek s křemenným hořákem

Výhody halogenidových výbojek s křemenným hořákem lze shrnout takto

- možnost široké úpravy spektrálního složení vyzařovaného světla v důsledku velmi širokého výběru svíticích prvků, sloučenin a jejich kombinací,
- velký rozsah příkonů (70 až 5 000 W, u některých speciálních typů i více),
- vynikající podání barev osvětlovaných předmětů při velkém měrném výkonu výbojky,
- možnost vytvořit rozměrově kompaktní světelné zdroje s velkým příkonem na jednotku objemu; z toho vyplývá možnost navrhovat materiálůvě úsporná svítidla s vyšší účinností a s velmi dobrou možností usměrnění světelného toku v požadovaném směru,
- dlouhý život.

K nevýhodám, kromě technologické náročnosti a z toho vyplývajících vyšších pořizovacích cen, patří

- nutnost použít zapalovací zařízení (s výjimkou některých výbojek s malým příkonem se zabudovaným zapalovačem, resp. malé části sortimentu výbojek, jejichž náplň dovoluje použít pomocnou elektrodu),
- poměrně velká citlivost parametrů výbojek na kolísání napětí sítě,
- větší rozptyl kolorimetrických parametrů mezi jednotlivými výbojkami stejného typu i jejich větší změny u jednotlivých výbojek v průběhu svícení (výrobci přiznávají možné změny teploty chromatičnosti v intervalu ± 600 K), stejně jako změna těchto parametrů v závislosti na poloze svícení.

²⁵ DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje – halogenidové výbojky. FCC Public, časopis SVĚTLO 2009/1

Halogenidové výbojky s keramickým hořákem



Obr. 20 – Halogenidová výbojka s keramickým hořákem

Zvládnutí technologie umožňující používat halogenidy kovů v kombinaci s keramickým hořákem vedlo k významnému doplnění předností zmíněných světelných zdrojů, zejména v těchto směrech:

- další rozšíření příkonové řady směrem k malým příkonům (aktuálně až na 20 W),
- další zvýšení měrného výkonu i u typů s malými příkony (20 až 35 W) při vynikajícím podání barev,
- zmenšení rozptylu kolorimetrických parametrů mezi jednotlivými výbojkami nezávisle na poloze svícení,
- významné zlepšení stability teploty chromatičnosti během života (± 200 K v porovnání s ± 600 K u výbojek s křemenným hořákem),
- libovolná poloha svícení,
- další zmenšení rozměrů vlastního hořáku, a tedy i výbojky a z toho vyplývající další zlepšení účinnosti soustavy světelný zdroj-předřadník-svítidlo,
- významné zlepšení zrakové pohody díky výhradnímu provozu výbojek menších příkonů pouze s elektronickými vysokofrekvenčními předřadníky.

Uvedené výhody napomohly rozšířit oblasti použití výbojek, zejména v interiérech s vysokými požadavky na kvalitu osvětlení. Technologie jejich výroby je však ještě náročnější než u předchozí skupiny výbojek i než u vysokotlakých sodíkových výbojek (při výrobě jejich hořáku se rovněž využívá korundová keramika).



Obr. 21 – Halogenidová výbojka s keram. hořákem nového typu (OSRAM)

K novinkám poslední doby patří výbojky s keramickým hořákem nového tvaru. Namísto typického válcového uvedla firma Osram na trh výbojky s hořákem ve tvaru blízkém elipsoidu – Powerball. Hořák tohoto tvaru se postupně rozšířil na celý sortiment výbojek od 20 do 400 W. Vynikající parametry těchto výbojek jsou dány mj. i originálním tvarem svítící trubice, který lépe kopíruje kontury výboje, vyznačuje se rovnoměrnějším rozložením teploty stěny hořáku, což přispívá k dosažení vyššího měrného výkonu.

Vysokotlaké sodíkové výbojky

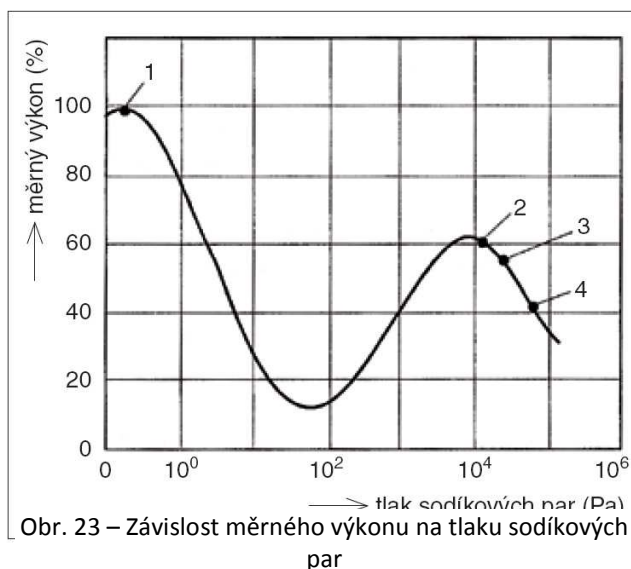
Výboj v parách sodíku je ze světelně technického hlediska velmi zajímavý. Sodík se vyznačuje intenzitním rezonančním dubletem ve žluté části viditelného spektra s vlnovou délkou 589,0 a 589,6 nm, která se blíží maximu spektrální citlivosti lidského oka (555 nm).

Těchto vlastností, vedle nízkého budicího potenciálu uvedené čáry, se využívá již od třicátých let při konstrukci nízkotlakých sodíkových výbojek, v nichž tlak par sodíku při pracovní teplotě 270 °C dosahuje hodnoty asi 0,5 Pa. Při zvyšování tlaku par sodíku světelná účinnost klesá, prochází minimem a dále opět stoupá, takže při tlaku kolem 27 kPa dosahuje druhého maxima (viz. **Obr. 23**) a v závislosti na dalších parametrech (složení amalgamu sodíku, druh a tlak plnicího plynu, geometrické parametry hořáku, příkon výbojky apod.) může dosáhnout hodnoty až 150 lm/W.

Při rostoucím tlaku par sodíku dochází k výraznému rozšíření spektrálních čar a ke vzniku silného spojitého záření, přičemž zároveň je absorbováno záření rezonanční. Se zvyšujícím se tlakem je stále zřetelnější asymetrie rozšiřování rezonančních čar do dlouhovlnné části spektra. Spektrum záření je bohatší, což má za následek i lepší podání barev osvětlovaných předmětů. Tento druh výboje je využíván u moderních vysokotlakých sodíkových výbojek, které se výrazně prosadily zejména v uličním, ale i v průmyslovém osvětlení.



Obr. 22 – vysokotlaká sodíková výbojka



Obr. 23 – Závislost měrného výkonu na tlaku sodíkových par

- 1 – nízkotlaké sodíkové výbojky Ra=0
- 2 – vysokotlaké sodíkové výbojky Ra=25
- 3 – vysokotlaké sodíkové výbojky se zlepšeným podáním barev Ra=60
- 4 – vysokotlaké sodíkové výbojky s vynikajícím podáním barev Ra>85

Vysokotlaké sodíkové výbojky jsou tedy světelné zdroje, v nichž světlo vzniká hlavně zářením sodíkových par s pracovním parciálním tlakem v rozmezí 3 až 60 kPa.

Vysokotlaké sodíkové výbojky je nutné provozovat v obvodu s tlumivkou a vhodným zapalovacím zařízením, který vyhovuje mezinárodním normám CEI. Schéma zapojení je shodné se zapojením halogenidových výbojek. Při dodržování provozních podmínek (povolené kolísání napětí menší než 5%, správně dimenzované tlumivky) výbojky předních výrobců dosahují života 16 000 až 28 000 hod. Ukončení života je dáno postupným nárůstem napětí na výboji. Při překročení určitého poměru tohoto napětí vzhledem k napájecímu napětí sítě výboj zhasne. Po vychladnutí výbojka znovu zapálí a celý cyklus se opakuje. Periodické zhasínání výbojek je příznakem ukončení života a výbojku je nutné vyměnit.

K hlavním přednostem vysokotlakých sodíkových výbojek patří:

- vysoký měrný výkon při přijatelném podání barev (standardní sortiment má Ra 20 až 25),
- dlouhý život dosahující až 30 tisíc hodin při dobré stabilitě světelného toku během života,
- spolehlivý provoz a snadná údržba,
- zvládnutá technologie hromadné výroby a z toho vyplývající přijatelná cena,
- kompaktní rozměry výbojky i hořáku, umožňující konstruovat materiálově úsporná svítidla s dobrou účinností,
- značný počet výrobců vytvářejících žádoucí konkurenci na trhu, což při vysokém stupni standardizace základního sortimentu vytváří silný tlak na jejich cenu.

Díky jejich příjemné teplé barvě světla v základním sortimentu ($T_{cp} = 2\,000$ až $2\,500$ K) a vysoké účinnosti zůstává hlavní oblastí použití popisovaných výbojek uliční osvětlení, osvětlení tunelů, náměstí, nádražních hal, průmyslových objektů, velkých prostranství, letišť, osvětlení fasád atd., kde nejsou kladeny příliš velké požadavky na jakost podání barev. Okruh jejich použití se však v souvislosti s bouřlivým rozvojem halogenidových výbojek s keramickým hořákem poněkud zužuje a očekává se, že budou částečně vytlačeny z veřejného osvětlení zejména v historických centrech měst.

Nízkotlaké sodíkové výbojky



U sodíkových výbojek nastává výboj ve výbojové trubici vyhotovené z polykrystalického anebo monokrystalického kysličníku hlinitého, která je naplněna argonem, neonem a sodíkem. Při tlaku sodíkových par $0,5$ Pa a teplotě stěny výbojové trubice 270 až 300 °C vyzáří monochromatické záření v pásmu vlnových délek 589 a $589,6$ nm ve žluté oblasti spektra. Záření sodíkové výbojky je v blízkosti maxima spektrální citlivosti lidského oka s vysokým měrným výkonem 130 až 200 lm/W. V jejich světle není možné rozlišovat barvy $R_a = 0$, život výbojky dosahuje až $24\,000$ hod.. Výbojová trubice sodíkových výbojek má kruhový průřez a ohýbá se do tvaru písmena U nebo W. Venkovní baňka tepelně izoluje výbojovou trubici, je jednoduchá a vyčerpaná na vysoké vakuum.

K hlavním přednostem nízkotlakých sodíkových výbojek patří:

- vysoký měrný výkon dosahující u nejvýkonnějšího typu při napájení speciálním předřadníkem téměř 200 lm/W,
- dlouhý život dosahující až 20 tisíc h při velmi dobré stabilitě světelného toku během života,
- nízký jas povrchu výbojky v porovnání s vysokotlakými výbojovými zdroji,
- široký teplotní interval, v němž je účinnost výbojky nezávislá na teplotě okolního prostředí,
- zajišťují dobrou viditelnost i v podmínkách husté mlhy,
- spolehlivý zápal i při teplotách do -20 °C a vzhledem k používaným předřadníkům a nízkému tlaku náplně i velmi rychlý – u výbojek s nižšími příkony téměř okamžitý – opakovaný zápal při krátkodobém výpadku napájecího napětí,
- neobsahuje zdraví škodlivou rtuť, nicméně s ohledem na poměrně vysoký obsah sodíku je nutné s vyhořelými výbojkami nakládat stejně jako s ostatními výbojovými světelnými zdroji.

K nevýhodám těchto výbojek patří:

- velmi špatné podání barev, vyplývající z téměř monochromatického charakteru spektra vyzařovaného světla charakterizované $R_a = 0$,
- značná pulzace světelného toku, vyplývající z velmi malé setrvačnosti nízkotlakého výboje v parách sodíku,
- vyšší zápalné napětí, vyžadující použití speciálních předřadných obvodů,
- omezená horní hranice příkonu výbojky; výbojky o vyšších příkonech se vyznačují většími rozměry, a příslušná svítidla jsou tedy materiálově náročnější a často je obtížné optimalizovat rozložení svítivosti z hlediska osvětlení dané plochy,
- postupný nárůst příkonu v průběhu života (až o 40 %), s čímž je nutné počítat při navrhování osvětlovací soustavy,
- vyšší ztráty v předřadníku v porovnání s jinými výbojovými zdroji, což znehodnocuje vysoký měrný výkon vlastního světelného zdroje, a vyšší materiálová náročnost předřadníků vedoucí k větší hmotnosti a vyšší ceně svítidla,
- náročná technologie sériové výroby.

Vlastnosti nízkotlakých sodíkových výbojek lze podobně jako u velké většiny jiných světelných zdrojů zlepšit provozem s vysokofrekvenčními předřadníky.

Díky své vysoké účinnosti (přičemž teoretické možnosti nízkotlakého výboje v parách sodíku se pohybují až okolo 500 lm/W^{26}), ale pro naprosto nevyhovující kvalitu podání barev zůstává hlavní oblastí použití těchto výbojek pouze osvětlení dálnic a zčásti osvětlení tunelů, popř. bezpečnostní, speciální technologické anebo dekorativní osvětlení. V minulosti velmi rozšířené osvětlení některých západoevropských měst těmito výbojkami však již zcela ustoupilo vysokotlakým sodíkovým a zejména moderním halogenidovým a zčásti i indukčním výbojkám. Nízkotlaký výboj v parách sodíku je využit rovněž ve spektrálních sodíkových výbojkách určených ke spektrofotometrickým měřením.

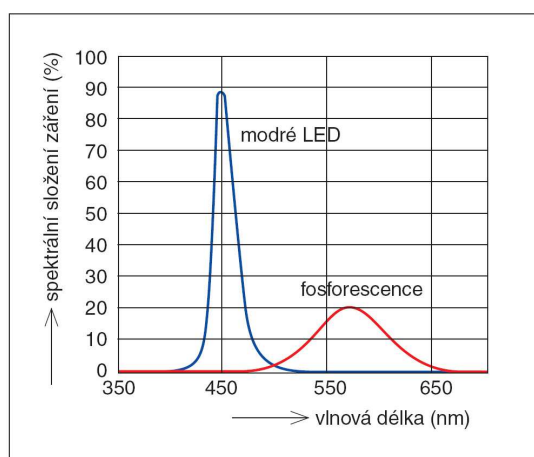
LED diody

Světelné diody (Elektroluminiscenční diody LED – Light Emitting Diode) se v posledních letech ve stále větší šíři používají v nejrůznějších oblastech techniky. Za své rozšíření vděčí především rostoucí světelné účinnosti. Současně se celosvětově investuje do hromadné výroby těchto prvků, a proto jejich cena neustále klesá.

Světelná dioda je elektronický prvek, který generuje světelné záření při průchodu proudu polovodičovým přechodem. Používá tedy jiný fyzikální princip než žárovky nebo výbojky a má mnoho vlastností, kterými se od klasických zdrojů světla odlišuje:

- Polovodičový přechod vždy vyzařuje velmi úzké spektrum a záření v různých vlnových délkách, které je v podstatě monochromatické.
- Použitím tří čipů v jednom pouzdru lze pak dosáhnout jakékoliv potřebné barvy a teploty chromatičnosti.
- Dalším způsobem je použití modrého čipu, který se uvnitř pouzdra ještě opatří vrstvou aktivní hmoty, která na principu podobném luminoforu v zářivkách nebo obrazovkách částečně převede modré záření na jiné vlnové délky viditelného spektra a výsledným efektem je pak bílá barva.

²⁶ Spravočnaja kniga po svetotechnike. 3-? pererabotannoje izdanije, Znack, Moskva, 2008



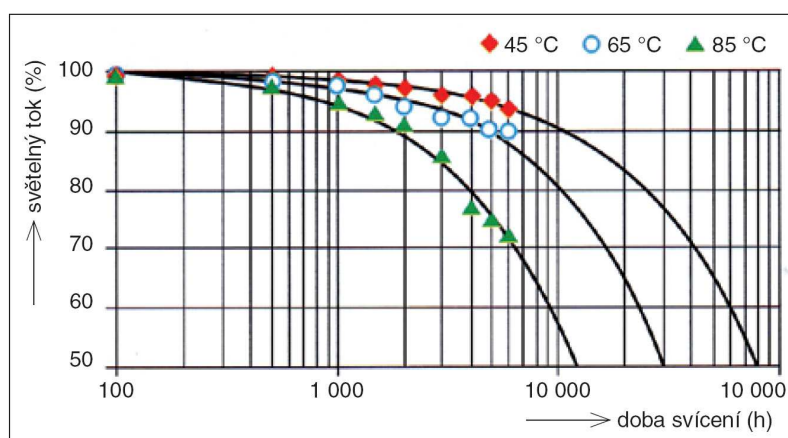
Obr. 24 - Emisní spektrum bílé LED
(luminofor buzený světlem modré diody)

závisí na dodržení maximální provozní teploty udávané výrobcem. Při vylepšení teplotních podmínek na vlastním PN přechodu světelných diod lze očekávat životnosti až okolo 100 000 hodin. Srovnáme-li dobu života světelných diod se světelnými zdroji, pak můžeme konstatovat, že světelné diody již v současné době začínají převyšovat v tomto parametru ostatní světelné zdroje. Ale pozor – vysoká teplotní závislost.

Provozní parametry současných světelných diod a jejich možnosti

Měrný výkon světelných diod se pohybuje okolo 100 lm/W u nejlepších zdrojů a to ještě za optimálních podmínek (70 a 135 lm/W). Tato hodnota se v současnosti začíná vyrovnávat měrným výkonům zářivek a halogenidových výbojek a v brzké budoucnosti má potenciál ještě výrazně narůstat.

Doba života (životnosti) se u bílých výkonových světelných diod udává okolo 50 000 hodin, přičemž v průběhu této doby světelný tok klesá podobným způsobem jako je tomu u klasických světelných zdrojů. Doba života ale silně



Obr. 25 – Závislost parametrů LED na teplotě okolí

Provozní teplota světelné diody vyzařují v infračervené oblasti pouze minimální množství energie, a proto je lze používat i na osvětlování předmětů citlivých na teplo. Nicméně čipy výkonových světelných diod teplo generují a proto je nutné je chladit. Z důvodu nutnosti odvodu tepla z „relativně malého“ PN přechodu se maximální hodnoty příkonů jednotlivých světelných diod v současné době pohybují do 5 W.

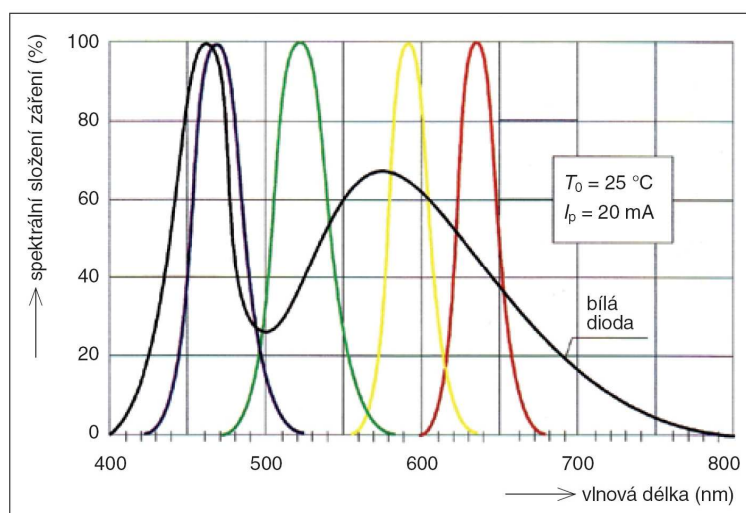
Odolnost proti otřesům je vůči klasickým teplotním a výbojovým světelným zdrojům vysoká. Je srovnatelná s mechanickou odolností jiných elektronických součástek. Záleží přitom na způsobu a kvalitě montáže vzhledem k aplikacím. Jejich mechanická odolnost je předurčuje k použití ve všech typech mobilních prostředků a v dopravní technice.

UV záření není díky pozitivním principům vyzařováno barevnými ani bílými světelnými diodami, protože světlo je vyzařováno v úzkém intervalu vlnových délek. Výjimkou jsou ultrafialové LED, kde je toto záření naopak žádoucí.

Napájecí napětí je na rozdíl od většiny klasických světelných zdrojů nízké a stejnosměrné. Tuto vlastnost lze chápat jako konkurenční výhodu proti ostatním světelným zdrojům především v mobilních aplikacích využívajících bateriového napájení.

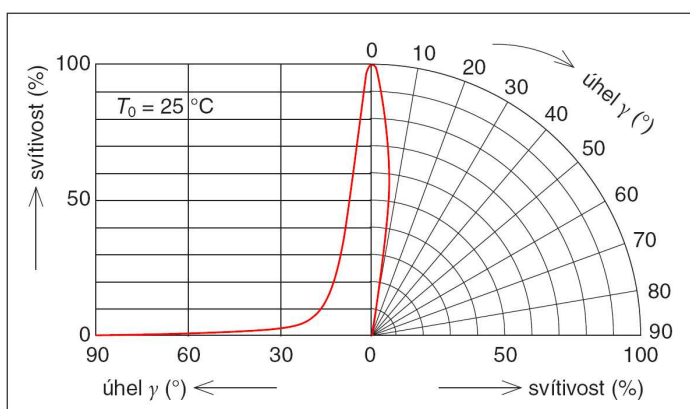
Stmívání v podstatě vždy se k napájení používá elektronika a je možné intenzitu světla regulovat pulzně šířkovou modulací, kdy se elektronika rozšíří pouze o příslušné obvody. Stmívání je tedy možné v celém rozsahu vyzařovaného světelného toku (nikoliv skokově, ale dynamicky) a nedochází k výraznému snižování měrného výkonu a ani doby života světelných zdrojů. Další výhodou řízení světelného toku pulzně šířkovou modulací je jeho možnost okamžité reakce na změny světelných podmínek v zorném poli snímací techniky.

Barva světla závisí na výběru teploty chromatičnosti modulů se světelnými diodami pro konkrétní aplikace. Tento parametr je velmi důležitý z pohledu použití světelných diod do různých aplikací. Vzhledem k používaným technologiím výroby bílé barvy světla transformací světelného toku z kratších vlnových délek se dosahují vyšší měrné výkony u světelných diod s vysokou teplotou chromatičnosti.



Obr. 26 – Emisní spektrum barevných LED

Index podání barev se pohybuje u bílých výkonových diod spíše do 80. Pro použití v prostorách s předpokládaným trvalým pobytém osob, je nutné tomuto parametru věnovat zvýšenou pozornost.



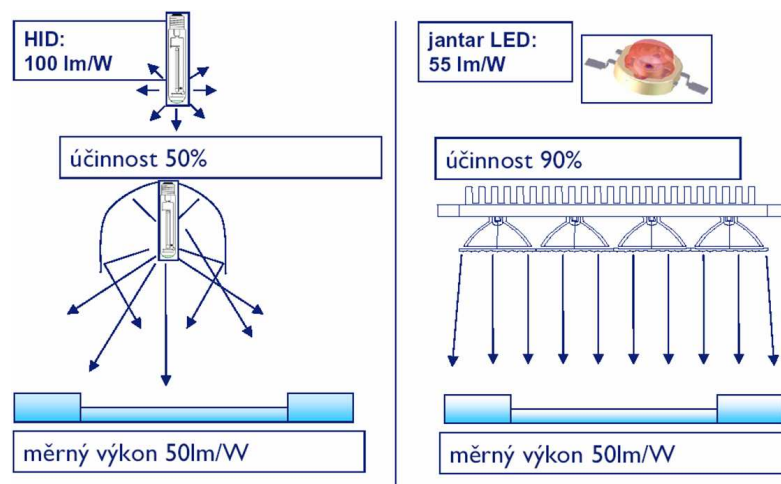
Obr. 27 – Příklad rozložení svítivosti LED v pravoúhlých a polárních souřadnicích

Časté zapínání a vypínání světelným diodám nevadí s ohledem na jejich princip časté zapínání a vypínání, na které jsou citlivé například zdroje zářivkové. Po zapnutí startují LED okamžitě a jsou schopny nabídnout hned plný výkon.

Úhel vyzařování světelného svazku je u běžně dostupných světelných diod od 10 do 100 stupňů. Malých úhlů svazku lze dosáhnout bez použití vnějších reflektorů již samotnou optikou pouzdra. Přímým směřováním

světelného toku bez následných přidavných odrazů a prostupů světelných paprsků se dosahuje výrazně vyšších hodnot účinnosti svítidel. TO ale vyžaduje naprosto odlišnou a novou filozofii konstrukce svítidel.

Nastavení požadované distribuce světelného toku – skládáním světelných diod do modulů lze snadno dosáhnout téměř libovolného tvaru křivky svítivosti. Pozor na vysoké jasy (možné oslnění) v určitých směrech, protože světelný tok je vyzařován z relativně malých plošek.



Obr. 28 - Grafické znázornění výhod distribuce světelného toku u svítidel osazených LED diodami ve srovnání se svítidly osazenými klasickými světelnými zdroji

Maximální příkon svítidel se v současné době pohybuje maximálně do 10 W. Tento limit je de-facto dán možnostmi chlazení svítidel při normální teplotě okolí (20-25 °C).

Údržba svítidel – tedy čištění svítidel zůstává identické – tzn. Náklady na údržbu klesají pouze v souvislosti s výměnami zdrojů a i to je pouze teoretický předpoklad – výměna světelného zdroje u svítidla obsazeného LED je ve většině případů téměř nemožná a je nutné osadit kompletní svítidlo nové.

3.3. Rozbor vybraných světelných zdrojů podle výrobců

Světelné zdroje vhodné pro osvětlování v průmyslové hale musí splňovat řadu kritérií stanovených v normě ČSN EN 12464-1. Jsou to především tyto parametry:

Index podání barev – tento parametr byl již popsán výše a musí být vyšší, než jak je uvedeno v normativních požadavcích.

Náhradní teplota chromatičnosti – tento parametr udávaný v kelvinech dává informaci o barvě světla světelného zdroje. Barva světla by se ve standardních halách měla pohybovat v bílé oblasti (tzn. zhruba v oblasti mezi 3300 K – 5300 K). Nižší teplota chromatičnosti (teplejší barva světla) v pracovních prostorech působí příliš uklidňujícím dojmem. Vyšší teploty chromatičnosti (denní barva světla) sice působí stimulačně, nicméně se doporučuje tuto barvu světla používat až od vyšších hodnot osvětleností (cca 750 lx).

Střední doba života světelného zdroje – doba, za kterou dojde k výpadku 50 % světelných zdrojů.

Doba za kterou poklesne světelný tok světelného zdroje na 80% jmenovité hodnoty – velmi důležitý údaj, který by měl cca odpovídat intervalu výměny světelných zdrojů. Pokles světelného toku světelného zdroje na 80 % jmenovité (počáteční hodnoty) udává tzv. dobu užitečného života světelného zdroje.

Jako nejvhodnější světelné zdroje splňující požadavky na osvětlení průmyslových hal se jeví halogenidové výbojky. Jako alternativu k nim lze považovat lineární zářivky, avšak za předpokladu že budou použity speciální svítidla, které umožňují montáž do větších výšek cca 10m. Tyto svítidla však mají nízké krytí IP a proto nevyhovují nasazení v prašném prostředí. Jako další alternativa se nabízejí indukční výbojky. Jedná se o moderní světelný zdroj a existuje pro něj mnoho svítidel s dostatečným krytím IP. Proto jsem pro další návrh osvětlovací soustavy vybral halogenidové výbojky a jako energetický úspornější alternativu pak indukční výbojky.

3.3.1. Dostupné halogenidové výbojky

Po předběžném výpočtu osvětlovací soustavy v programu RELUX Profesionál 2007 bylo zjištěno, že bude nejvhodnější instalovat halogenidové výbojky o výkonu 250W. Proto je srovnání jednotlivých světelných zdrojů omezeno na tuto výkonovou hodnotu. Jako další kritérium pro výběr světelného zdroje bylo stanoveno jednopaticové provedení z důvodu jednoduchosti výměny. V následující Tab. 2 jsou uvedeny produkty z této oblasti tří předních světových producentů světelných zdrojů²⁷.

Výrobce	Typ	Výkon	Světelný tok	Stupeň podání barev Ra	Teplota chromatičnosti	Měrný výkon	Stmívatelnost	Životnost	Patice
		[W]	[lm]	[-]	[K]	[lm/W]		[h]	
PHILIPS Lighting	MASTER HPI-T Plus 250W/645 E40 1SL	250	20500	65	4500	84	ne	11000	E40
	MASTER HPI Plus 250W/767 BU E40 1SL	250	18000	69	6700	72	ne	11000	E40
	MASTER HPI Plus 250W/745 BU-P E40 1SL	250	18000	69	4500	72	ne	11000	E40
OSRAM	HQI-T 250/D	250	20100	90	5000	82	ne	12000	E40
	HQI-T 250/N/SI	250	19200	65	4400	77	ne	12000	E40
	HQI-E 250/D	250	19400	90	5300	78	ne	12000	E40
GE Lighting	CMH250/TT/UVC/U/830/E40	250	25000	80	3000	100	ne	24000*	E40
	CMH250/E/UVC/U/830/E40/D	250	23500	80	3000	94	ne	24000*	E40
	ARC250/T/H/742/E40	250	21000	70	4200	84	ne	10000*	E40
	ARC250/T/VBU/960/E40	250	19000	90	6000	76	ne	10000*	E40
	ARC250/D/VBU/960/E40	250	17000	90	6000	68	ne	10000*	E40

Tab. 2 – Srovnání parametru halogenidových výbojek různých výrobců ve výkonové třídě 250W

*údaj nejde porovnávat, výrobce neudává jak je životnost definována

²⁷ Katalogové listy jednotlivých výbojek naleznete v příloze.

Kritéria pro výběr byla stanovena takto:

- co největší stupeň podání Ra (min. 80)
- teplota chromatičnosti - denní světlo (cca 5000 K)
- dobrý měrný výkon (ekonomika provozu)

Stanoveným kritériím nejlépe vyhovuje výbojka **HQI-E 250/D** od výrobce OSRAM.

3.3.2. Dostupné indukční výbojky

V následující tabulce jsou uvedené indukční výbojky nejvyšších dostupných výkonů jednotlivých výrobců a to z důvodů max. úspory co se počtu svítidel týče. U tohoto světelného zdroje představují náklady na zdroj, svítidlo a předřadník značnou finanční zátěž. Z tohoto důvodu jsem šel cestou co nejmenšího počtu svítidel, tedy max. výkonu světelných zdrojů. Výběr indukčních výbojek je značně omezený a následující Tab. 3 představuje celkový přehled nejvýkonnějších indukčních výbojek od jednotlivých výrobců.

Výrobce	Typ	Výkon [W]	Světelný tok [lm]	Stupeň podání barev Ra [-]	Teplota chromatičnosti [K]	Měrný výkon [lm/W]	Stmívat elnost	Životnost [h]
PHILIPS Lighting	MASTER QL 165/840	165	12000	80	4000	73	ne	60000
	MASTER QL 165/830	165	12000	80	3000	73	ne	60000
	MASTER QL 165/827	165	12000	80	2700	73	ne	60000
OSRAM	ENDURA 150W/840	150	12000	>80	4000	83	ne	60000
	ENDURA 150W/830	150	12000	>80	3000	83	ne	60000
GE Lighting	GENURA EL23/R25/SW	65	1100	82	2700	47	ne	15000
	GENURA EL23/R25/WW	65	1100	82	3000	47	ne	15000

Tab. 3 - Srovnání parametru indukčních výbojek různých výrobců

Budeme vycházet ze stejných kritérií jako při výběru halogenidových výbojek tzn.:

- co největší stupeň podání Ra (min. 80)
- teplota chromatičnosti - denní světlo (cca 5000 K)
- dobrý měrný výkon (ekonomika provozu)

Stanoveným kritériím nejlépe vyhovuje výbojka **ENDURA 150W/840** od výrobce OSRAM.

3.4. Výběr typů vhodných svítidel

3.4.1. Světelně technické parametry svítidel

Světelný tok svítidla Φ_{SV} , který je svítidlem opticky upraven, je dán rozdílem světelného toku všech zdrojů Φ_Z umístěných ve svítidle a světelného toku ztraceného Φ_{ZTR} , který se ztratil při optickém zpracování. Rozdělení svítidel podle rozložení jejich světelného toku je znázorněno v Tab. 4.

Účinnost svítidla charakterizuje hospodárnost svítidla a její hodnota je dána poměrem světelného toku svítidla ke světelnému toku zdrojů dle vztahu:

$$\eta_{SV} = \frac{\Phi_{SV}}{\Phi_Z}, \quad [-; \text{lm}, \text{lm}] \quad (29)$$

kde

Φ_{SV} ... světelný tok svítidla

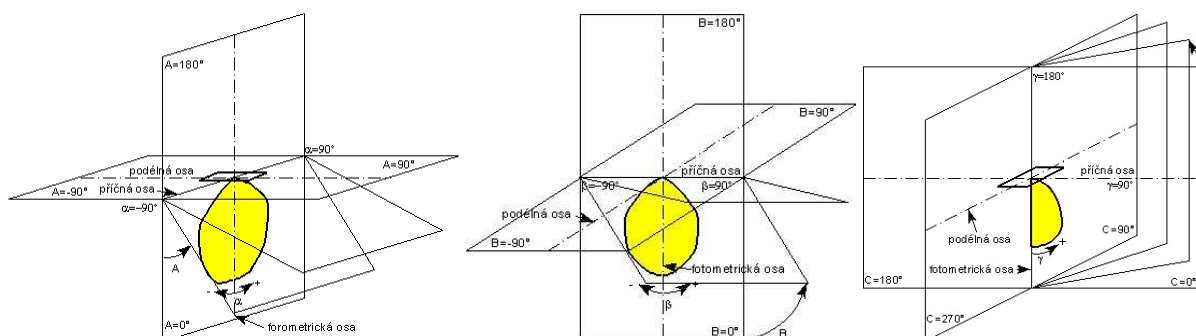
Φ_Z ... světelný tok všech zdrojů světla ve svítidle

Maximální účinnost by měl z tohoto hlediska holý světelný zdroj v objímce. Ten však není možné použít s ohledem na oslnění, nevhodné směřování vyzařovaného světelného toku a nedostatečnou ochranu ve většině případů před povětrnostními vlivy. Z hlediska maximálního využití dodávané elektrické energie je třeba dosahovat vysokých hodnot této veličiny. U běžných svítidel se pohybuje účinnost v rozmezí od 0,3 do 0,9.

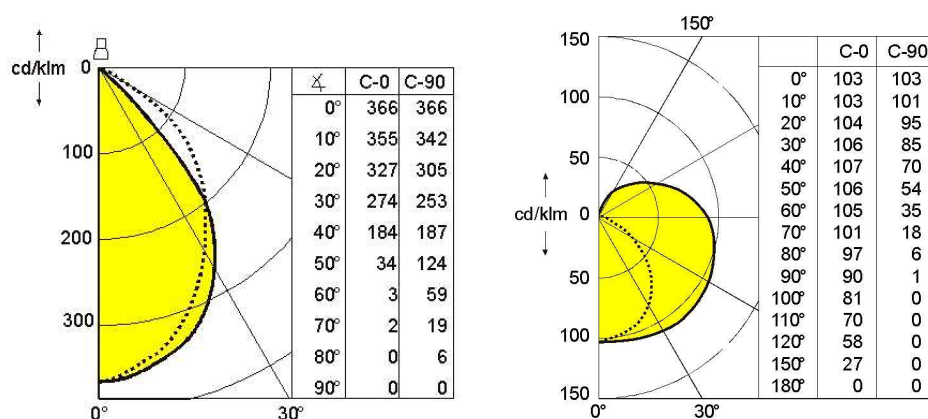
Křivky svítivosti svítidel

Prostorové rozložení svítivosti svítidel je souměrné anebo nesouměrné. Souměrné rozložení může být rotační anebo souměrné k jedné anebo více axiálním rovinám.

Svítivosti se udávají nejčastěji pomocí fotometrického systému C- γ . U svítidel s rotačně symetrickou křivkou svítivosti postačí měřit a zobrazovat křivku v jedné fotometrické rovině. Rozložení svítivosti svítidel lze též znázorňovat pomocí izokandelového diagramu.



Obr. 29 - Křivky svítivosti ve fotometrických systémech A- α , B- β , C- γ



Obr. 30 - Příklady křivek svítivosti

Jas svítidel

Jas svítidla je definován jako podíl svítivosti v daném směru a velikosti průmět svítící plochy do roviny kolmé k uvažovanému směru viz vztah:

$$L_{\gamma} = \frac{I_{\gamma}}{A \cdot \cos \gamma}, \quad [\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd}, \text{m}^2] \quad (30)$$

kde

I_{γ} ... je svítivost svazku světelných paprsků (svítící plochy)

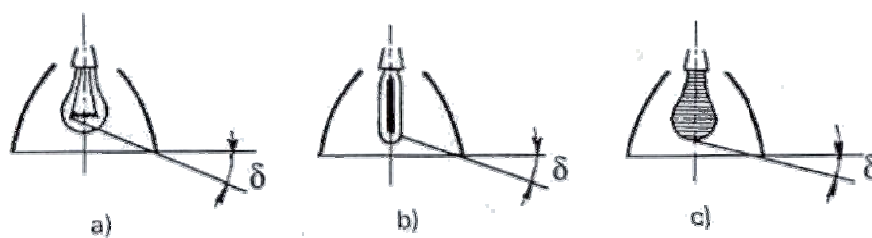
A ... je velikost svítící plochy viditelné pozorovatelem

γ ... je velikost svítící plochy viditelné pozorovatelem

U svítidel pro osvětlování vnitřních prostorů se pro kontrolu na oslnění udávají často jasy v kritické oblasti úhlů od 45 ° do 85 ° ve vodorovném směru pohledu.

Úhel clonění

Patří sem především úhel clonění δ , který udává míru zaclonění světelného zdroje svítidlem. Je to nejmenší ostrý úhel mezi vodorovnou rovinou a přímkou spojující okraj svítidla se světelným zdrojem. U čiré žárovky je to její vlákno, u opálové zářivky nebo výbojky je to povrch baňky.

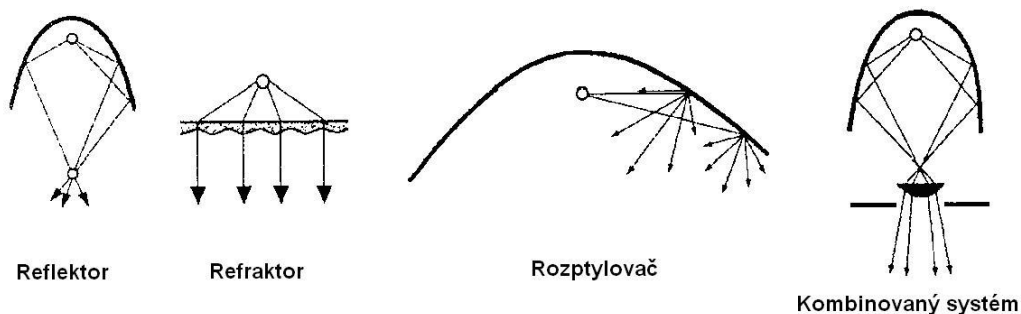


Obr. 31 - Úhel clonění u svítidla.

Doplňkový úhel do 90° k úhlu clonění se nazývá úhel otevření svítidla.

Základní principy usměrnění světelného toku

U většiny svítidel se k usměrnění světelného toku světelných zdrojů používají následující principy viz **Obr. 32**



Obr. 32 - Základní typy světelně aktivních ploch

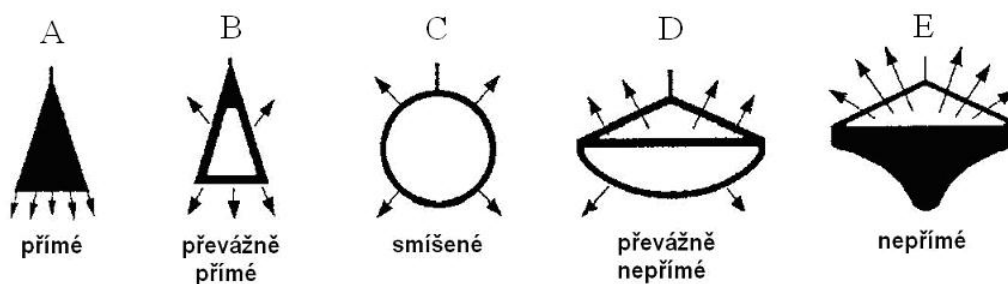
Třídění svítidel

Svítidla je možné rozdělit do skupin podle jejich vlastností, přičemž lze volit různá kritéria. Podle použitého světelného zdroje rozeznáváme svítidla žárovková, zářivková, výbojková, popř. i jiná. Podle oblasti použití je možné rozlišit svítidla vnitřní a venkovní.

Podstatou třídění svítidel jsou světelně technické vlastnosti. Nejjednodušší světelně technické třídění svítidel je třídění podle CIE, založené na prostorovém rozložení světelného toku do horního a dolního poloprostoru. Podrobně je uvedeno v Tab. 4.

Označení svítidla	Světelný tok do dolního poloprostoru (%)	Světelný tok do horního poloprostoru (%)	Značení podle DIN 5040
přímé	90 až 100	0 až 10	A
převážně přímé	60 až 90	10 až 40	B
smíšené	40 až 60	40 až 60	C
převážně nepřímé	10 až 40	60 až 90	D
nepřímé	0 až 10	90 až 100	E

Tab. 4 - Rozdělení svítidel podle rozložení jejich světelného toku



Obr. 33 - Rozdělení svítidel podle rozložení jejich světelného toku

Rozdělení svítidel podle elektrotechnických vlastností

Odpovídá elektrotechnickým předpisům (normám). Podle ochrany před nebezpečným dotykovým napětím tak lze v souladu s ČSN 34 1010 a 36 0000-1 rozlišit svítidla třídy 0, I, II a III.

- Třída 0 má pouze základní izolaci, to znamená, že nemá prostředky na připojení ochranného vodiče.
- Třída I znamená, že svítidlo má prostředek pro připojení vodivých částí na ochranný vodič.
- Třída II obsahuje jako ochranu před nebezpečným dotykem dvojitou nebo zesílenou izolaci.
- Třída III označuje svítidla na bezpečné napětí.

Svítidla musí být konstruována tak, aby jejich živé části nebyly přístupné, je-li svítidlo instalováno a připojeno pro normální používání, ani když je svítidlo otevřené za účelem výměny světelných zdrojů nebo předřadníků. Ochrana před úrazem elektrickým proudem musí být zachována při všech způsobech montáže a polohách svítidla.

Pro krytí svítidel platí ČSN EN 60 529 (33 0330), podle níž se druh krytí svítidla označuje zkratkou IP (International Protection) a dvojčíslím. První číslice (od 0 do 6) vyjadřuje ochranu před nebezpečným dotykem živých nebo pohybujících se částí a před vniknutím cizích předmětů, druhá (od 0 do 8) ochranu před vniknutím vody. Nejmenší krytí svítidel na nízké napětí je IP 20. Pro venkovní prostředí je třeba krytí před deštěm, tedy alespoň IP 23. Krytí IP 54 je běžné krytí svítidel proti stříkající vodě. Konstrukčně obdobně jsou tvořena svítidla s krytím IP 65, která však mají mnohem vyšší užitnou hodnotu. Vyšší ochrana proti vniknutí prachu a vody znamená prodloužení života optického systému svítidla a snížení nákladů na jeho údržbu (čištění).

Použití svítidel do určitého prostředí je dáno hlavně normou ČSN 333310. Zvláštní kategorii tvoří svítidla v nevýbušném provedení, která se mohou používat v prostorech s nebezpečím výbuchu, např. v dolech.

3.4.2. Kritéria výběru svítidel

Při výběru vhodného svítidla je třeba přihlédnout k mnoha aspektům, které jsou důležité pro správnou funkčnost a životnost navrhované osvětlovací soustavy.

Výrobce – při výběru svítidla se doporučuje brát v potaz výrobce s kreditem a historií.

Krytí – pro velmi špinavé prostředí je nejvhodnější pokud možno co nejvyšší krytí svítidel (maximální dosažitelné krytí - IP 68). Čím vyšší krytí svítidlo má, tím se zvyšuje jeho doba života a samozřejmě také interval jeho čištění. **Minimální akceptovatelné krytí pro osvětlované prostory v těžkém průmyslu je IP 54.**

Účinnost svítidla – tento parametr má u svítidel zejména obchodní charakter, protože nevypovídá nic o kvalitě navržené osvětlovací soustavy. Také z tohoto parametru nelze usuzovat do jakých směrů svítidlo svítí (jakou má křivku svítivosti) a jestli je tedy světelný tok směřován do míst zrakových úkolů. Parametr účinnost svítidla lze s výhodou použít pro porovnávání svítidel (v kombinaci s vhodnými světelnými zdroji) s podobným konstrukčním uspořádáním a s podobnými křivkami svítivosti. **Čím je účinnost svítidla vyšší, tím kvalitnější můžeme očekávat konstrukční provedení a výběr optických materiálů.**

Příkon svítidla – z tohoto údaje lze zjistit jaké ztráty způsobují předřadné přístroje (zejména tlumivky) ve svítidlech osazené. Čím menší je rozdíl mezi jmenovitým příkonem použitého světelného zdroje a jmenovitým příkonem svítidla, tím menší jsou ztráty předřadníku (kvalitnější tlumivka). Svítidlo generuje kromě nižší spotřeby ještě menší oteplení. Velké oteplení svítidel osazených předřadníky s vyššími ztrátami může mít výrazný vliv na zkrácení doby života svítidla, zejména v teplých provozech, kde se dá v určitých situacích očekávat pod střešou až teplota okolo 60°C.

Fyzické posouzení svítidel – velmi důležitý parametr, který může být stanoven skupinou nezávislých odborníků na problematiku údržby osvětlovacích soustav. Výše bodového hodnocení bude vypovídat o kvalitě zpracování dodaných vzorků svítidel a zejména o jednoduchosti jejich instalace a údržby v pracovní poloze.

Světelná stálost je důležitou veličinou, která určuje u mnoha materiálů jejich život. Stálým působením světelného a ultrafialového záření, zesíleného teplem a vlhkostí, dochází k trvalým změnám, např. žloutnutí, vbělení, zkrěhnutí, tvoření trhlin nebo praskání.

Teplotní stálost konstrukčních prvků má zvláštní význam, protože provozní teploty na svítidle dosahují často hodnot na hranicích přípustnosti. Pokud jsou tyto hodnoty překročeny, dochází k trvalým změnám, např. k deformaci, zkrěhnutí, zuhelnění a praskání - tvoření trhlin.

Odolnost kovů proti korozi musí být zajištěna účelnou povrchovou ochranou, která mimoto ovlivní ještě vzhled a světelně technické vlastnosti materiálu. Aby bylo vyhověno přípustným podmínkám použití, požadovaným světelnotechnickým parametrům a estetickým požadavkům, používají se následující povrchové úpravy: lakování, poniklování, pochromování, emailování, pozinkování, kadmiování, nanášení umělých hmot, leštění a eloxování. U plastů je odolnost proti korozi zaručena, a proto nevyžadují dodatečná opatření.

Mechanická pevnost je mírou stability konstrukčních prvků, především u plastů a křemenných skel. Vlivem záření, tepla, chladu a vlhkosti se může změnit mechanická pevnost, a tím i spolehlivost svítidla.

3.5. Srovnání vhodných svítidel podle výrobců

Provést výběr vhodného svítidla není zdaleka jednoduchý úkol. Je velké množství výrobců, kteří produkují mnoho typů svítidel vhodných k dané aplikaci. V prvním kroku je třeba určit o jaké svítidlo se bude jednat z hlediska rozdělení světelného toku (viz. Tab. 4). Z tohoto požadavku vzejde konstrukční provedení svítidla. V dalším kroku je třeba z této skupiny vybrat konkrétní svítidlo dle nabídek jednotlivých výrobců, přičemž budeme vycházet z parametrů popsanych v kapitole 3.3.2.

V podstatě se nabízejí dvě varianty výběru:

- podle katalogových údajů jednotlivých výrobců svítidel
- posouzením vzorků svítidel specialisty na údržbu osvětlovacích soustav

Posouzení svítidel na základě vyhodnocení katalogových údajů

V podstatě se jedná o získání technických specifikací jednotlivých parametrů svítidel a jejich uspořádání do přehledné tabulky. Z takto získaných dat pak vybrat svítidlo, které se nejvíc blíží požadovaným parametrům. Jinou variantou je vyhodnotit v jaké míře se jednotlivá svítidla blíží

požadovaným parametrům a přiřadit jednotlivým parametrům jejich důležitost (váhu). Takto zpracované data pak vyhodnotit pomocí multikriteriální analýzy.

Posouzení dodaných vzorků svítidel specialisty z oboru údržby:

V rámci technického posouzení osvětlovacích soustav je možné oslovit jednotlivé dodavatele o dodání vzorků svítidel, za účelem jejich posouzení. Nezávislí posuzovatelé pak můžou jednotlivé vzorky přímo fyzicky posoudit a ohodnotit zejména jejich kvalitu provedení a možnosti údržby v pracovní poloze. Příklad vhodných kritérií pro posuzování svítidel z hlediska jejich provozních vlastností uvádím v Tab. 5. Každý ze specialistů prostřednictvím této tabulky přidělí jednotlivým kritériím hodnotu a to pro každé z hodnocených svítidel. Vyhodnocením takto získaných dat prostřednictvím multikriteriální analýzy získáme celkové hodnocení pro jednotlivé svítidla. Nejvhodnější svítidlo je pak to s nejvyšším počtem bodů. Příklad takového vyhodnocení ukazuje Tab. 6.

číslo kritéria	1.	2.	3.	4.	5.	7.	8.	
<i>kritérium</i>	Předpoklad dlouhodobého zachování krytí svítidla - stálost parametrů	Provedení upevňovacího prvku ke stropu - montáž	Způsob otvírání krytu svítidla v pracovní poloze (náročnost + použití nástrojů)	Způsob provádění výměny světelného zdroje v pracovní poloze svítidla (náročnost)	Mechanická odolnost svítidla a krytu optiky	Možnost kompletní výměny předřadné části svítidla	Přístup ke komponentům v otevřeném svítidle v pracovní poloze	celkové hodnocení
<i>posuzovaný vzorek svítidla</i>	1 až 10	1 až 10	1 až 10	1 až 10	1 až 10	1 až 10	1 až 10	1 až 10

Tab. 5 – Kriteria pro posuzování svítidel

číslo kritéria	1.	2.	3.	4.	5.	7.	8.	
<i>kritérium</i>	Předpoklad dlouhodobého zachování krytí svítidla - stálost parametrů	Provedení upevňovacího prvku ke stropu - montáž	Způsob otvírání krytu svítidla v pracovní poloze (náročnost + použití nástrojů)	Způsob provádění výměny světelného zdroje v pracovní poloze svítidla (náročnost)	Mechanická odolnost svítidla a krytu optiky	Možnost kompletní výměny předřadné části svítidla	Přístup ke komponentům v otevřeném svítidle v pracovní poloze	celkové hodnocení
<i>posuzovaný vzorek svítidla</i>	1 až 10	1 až 10	1 až 10	1 až 10	1 až 10	1 až 10	1 až 10	1 až 10
Thorn	8	8	3	8	7	6	1	5,857142857
Apin	7	8	6	7	7	6	7	6,857142857
Zumtobel	8	8	6	8	8	6	2	6,571428571
Philips	7	8	4	6	7	6	2	5,714285714
Luxart	7	8	6	8	7	6	6	6,857142857
Siteco	8	6	5	7	8	4	1	5,571428571
Vyrtych - Goliáš	8	5	5	4	7	5	4	5,428571429

Tab. 6 – Výsledek multikriteriální analýzy posouzení svítidel

Výběr svítidla pro návrh osvětlení haly strojní údržby VP

V tomto případě bylo přikročeno k výběru svítidla prostřednictvím vyhodnocení katalogových údajů od jednotlivých výrobců svítidel. Základní požadavky na svítidla byly stanoveny takto.

Pro návrh klasické osvětlovací soustavy:

Provedení svítidla	závěsné (pro výšku 9,2m)
Typ svítidla	reflektor s tvrzeným bezpečnostním sklem
Krytí	IP65 (velmi prašné prostředí)
Světelný zdroj	halogenidová výbojka (OSRAM HQI-E 250/D)
Typ předřadníku	klasický (elektromagnetický)

Do výběru byly zahrnuty výrobky firem Enika - SBP, Siteco, Castaldi, Pracht.cz, Elektro-Lumen, Metasport, Luxart. Elektro-Lumen

Po důkladném výběru a přihlédnutí k finančnímu aspektu jsem vybral svítidlo **SBP Lama Quick Q/252**

Stručná specifikace svítidla:

Závěsné svítidlo se širokou škálou reflektorů, určené pro průmyslové i komerční aplikace. Stupeň ochrany IP 65. Každé svítidlo se skládá z pouzdra obsahujícího předřadník, hliníkového reflektoru, metakrylátového nebo polykarbonátového difuzoru a dalších doplňků (skla, ochranné mřížky, atd.). Tyto části se objednávají samostatně.



BOX Lama Q – toto pouzdro (box), obsahující předřadník, je vyrobeno z tlakem litého hliníku s konečnou úpravou v barvě RAL 9006 a je doplněno galvanizovaným závěsným hákem M8. V ceně je zahrnut konektor pro rychlé zapojení.

REFLEKTOR hliníkový

Průměr reflektoru: 340 mm nebo 480 mm.

34D, 48D - reflektory se širokým úhlem vyzařování



OCHRANNÉ SKLO je bezpečností, tvrzené a doplněné silikonovým těsněním a hliníkovými klipsy. Používá se u hliníkového reflektoru, kterému poskytuje ochranu IP 54. Sklo se vyrábí ve dvou velikostech, o průměru 340 mm (A0120/AL-34) a 480 mm (A0120/AL-48).



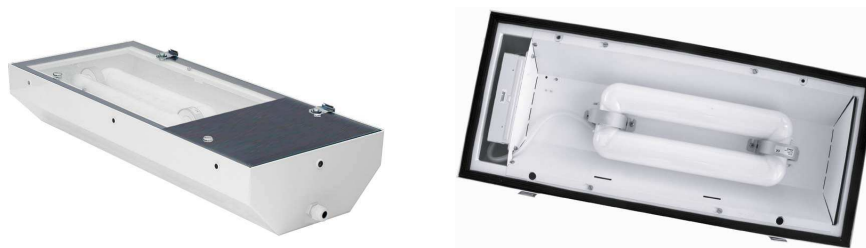
Pro návrh inovativní osvětlovací soustavy:

Provedení svítidla	závěsné (pro výšku 9,2m)
Typ svítidla	reflektor s tvrzeným bezpečnostním sklem
Krytí	IP65 (velmi prašné prostředí)
Světelný zdroj	indukční výbojka (OSRAM ENDURA 150W/840)
Typ předřadníku	elektronický

Do výběru byly zahrnuty výrobky firem Enika - SBP, Siteco, Castaldi, Pracht.cz, Elektro-Lumen, Metasport, Luxart. Elektro-Lumen

Po důkladném výběru a přihlédnutí k finančnímu aspektu jsem vybral svítidlo **Vyrtych PITBUL-I-ENDURA 1x150W**

Stručná specifikace svítidla:



Použití: Svítidla PITBUL - ENDURA jsou vybavena elektronickým předřadníkem a indukčním zdrojem ENDURA. Výhodou tohoto zdroje je velmi dlouhá životnost (cca 60 000 hodin). Takto vybavené svítidlo je vhodné především do prostoru s obtížnou a nákladnou výměnou světelných zdrojů.

Těleso svítidla: Těleso svítidla je vyrobeno z bíle lakovaného plechu. Na koncích tělesa jsou otvory s jednou plastovou ucpávkovou vývodkou a jednou ucpávkovou zátkou M20x1,5.

Kryt svítidla: Kryt svítidla je tvořen tvrzeným bezpečnostním sklem. Spojení tělesa a skla je řešeno pomocí pantů na jedné straně tělesa a šroubů na straně druhé. Stupeň krytí svítidla je zajištěn těsněním, které je uloženo v tělese svítidla.

Reflektor: Do základního tělesa je vložen reflektor, který je vyroben z bíle lakovaného plechu o tloušťce 0,5 mm. Je na něm uchycena elektrická výzbroj. Svítidla lze na zvláštní požadavek vybavit od výrobce jednofázovým nebo třífázovým průchozím propojením.

Systém uchycení: Svítidlo lze uchytit čtyřmi možnými způsoby – skrz nosný podklad pomocí šroubů M8 nebo pomocí závěsných ok, pomocí výložníků našroubovaných na boku tělesa nebo pomocí podhledového rámečku jako vestavné (podhledové).

Standardní výbava: 1x ucpávková vývodka M20, 1x ucpávková zátka M20.

4. Normativní požadavky na osvětlování průmyslových hal

4.1. Vnitřní pracovní prostory

- **ČSN EN 12 464-1** Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů
Část 1: Vnitřní pracovní prostory
- **ČSN EN 12 665** Světlo a osvětlení – Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení
- **ČSN 33 2000-1** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 1: Rozsah platnosti, účel a základní hlediska.
- **ČSN 33 2000-3** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 3: Stanovení základních charakteristik.
- **ČSN 33 2000-4-41** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 4: Bezpečnost. Kapitola 41: Ochrana před úrazem elektrickým proudem.
- **ČSN 33 2000-4-42** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 4: Bezpečnost. Kapitola 42: Ochrana před účinky tepla.
- **ČSN 33 2000-4-43** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 4: Bezpečnost. Kapitola 43: Ochrana proti nadproudům.
- **ČSN 33 2000-4-45** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 4: Bezpečnost. Kapitola 45: Ochrana před přepětím.
- **ČSN 33 2000-4-46** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 4: Bezpečnost. Kapitola 46: Odpojování a spínání.
- **ČSN 33 2000-4-47** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 4: Bezpečnost. Kapitola 47: Použití ochranných opatření pro zajištění bezpečnosti.
Oddíl 471: Opatření k zajištění ochrany před úrazem elektrickým proudem.
- **ČSN 33 2000-4-473** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 4: Bezpečnost. Kapitola 47: Použití ochranných opatření pro zajištění bezpečnosti.
Oddíl 473: Opatření k ochraně proti nadproudům.
- **ČSN 33 2000-4-481** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 4: Bezpečnost. Kapitola 48: Výběr ochranných opatření podle vnějších vlivů.
Oddíl 481: Výběr opatření na ochranu před úrazem elektrickým proudem podle vnějších vlivů.
- **ČSN 33 2000-5-51** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení, Kapitola 51: Všeobecné předpisy,
- **ČSN 33 2000-5-52** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení, Kapitola 52: Výběr soustav a stavba vedení,
- **ČSN 33 2000-5-53** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení, Kapitola 53: Spínací a řídicí přístroje,
- **ČSN 33 2000-5-523** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení, Kapitola 52: Výběr soustav a stavba vedení.
Oddíl 523: Dovolené proudy.
- **ČSN 33 2000-5-537** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení, Kapitola 53: Spínací a řídicí přístroje,
Oddíl 537: Přístroje pro odpojování a spínání.
- **ČSN 33 2000-5-54** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení, Kapitola 54: Uzemnění a ochranné vodiče.
- **ČSN 33 2000-6-61** Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 6: Revize. Kapitola 61: Postupy při výchozí revizi.
- **ČSN 36 0011-1** Měření osvětlení vnitřních prostorů
Část 1: Základní ustanovení
- **ČSN 36 0011-3** Měření osvětlení vnitřních prostorů
Část 1: Měření umělého osvětlení

- ČSN 36 0020 Sdružené osvětlení
- ČSN EN 60598-1 ed. 5 Svítidla – Část 1: Všeobecné požadavky a zkoušky
- ČSN EN 60598-2-1 Svítidla – Část 2: Zvláštní požadavky; Oddíl 1: Stacionární svítidla
- ČSN EN 60598-2-5 Svítidla – Část 2-5: Zvláštní požadavky – Širokouhlé světlo
- ČSN EN 60529 Stupně ochrany krytem (krytí - IP kód).
- ČSN EN 60446 Základní a bezpečnostní zásady při obsluze strojních zařízení
Značení vodičů barvami nebo číslicemi
- ČSN EN 60662 Vysokotlaké sodíkové výbojky
- ČSN EN 61167 Halogenidové výbojky
- ČSN EN 62035 Výbojové světelné zdroje – Požadavky na bezpečnost
- TNI 36 0450 Rušivé oslnění při osvětlení vnitřních prostor
- TNI 36 0451 Údržba vnitřních osvětlovacích soustav

4.2. Nouzové osvětlení

- Vyhlášky č. 246/2001 Sb. o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci) požárně bezpečnostním zařízením, se jeho důležitost
- ČSN EN 1838 Světlo a osvětlení - Nouzové osvětlení
- ČSN EN 50 172 Systémy nouzového únikového osvětlení
- ČSN 33 2000-5-56 Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
Část 5: Výběr a stavba el. zařízení, Kap. 56: Napájení zařízení v případě nouze.
- ČSN EN 60 598-2-22 Svítidla- Část 2-22: Zvláštní požadavky – Svítidla pro nouzové osvětlení

4.3. Denní osvětlení

- ČSN 36 0011-1 Měření osvětlení vnitřních prostorů
Část 1: Základní ustanovení
- ČSN 36 0011-2 Měření osvětlení vnitřních prostorů
Část 1: Měření denního osvětlení
- ČSN 73 0580-1 Denní osvětlení budov
Část 1: Základní požadavky
- ČSN 73 0580-4 Denní osvětlení budov
Část 4: Denní osvětlení průmyslových budov

4.4. Hygienické vyhlášky

- zákon č. 251/2005 Sb., o inspekci práce
- zákon č. 338/2005 Sb., úplné znění zákona č. 174/1968 Sb., o státním odborném dozoru nad bezpečností práce v platném znění
- nařízení vlády č. 362/2005 Sb., o bližších požadavcích na bezpečnost a ochranu zdraví při práci na pracovištích s nebezpečím pádu z výšky nebo do hloubky
- zákon č. 47/1994 Sb., kterým se mění a doplňuje zákon České národní rady č. 2/1996 Sb., o zřízení ministerstev a jiných ústředních orgánů státní správy České republiky, ve znění pozdějších předpisů, a zákon č. 174/1968 Sb., o státním odborném dozoru nad bezpečností práce, v platném znění
- vyhláška č. 246/2001 Sb. Vyhláška Ministerstva vnitra o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci).

5. Posouzení stávajícího stavu osvětlení průmyslové haly

Přesné rozměry a situační schéma budovy naleznete v **příloze č.1**. Z těchto parametrů budovy se vychází v následujících světelně technických výpočtech osvětlenosti. Rovina svítidel nad podlahou je 9,2m.

5.1. Měření umělého osvětlení

Měření stávajícího stavu umělého osvětlení v hale strojní údržby VP bylo provedeno Českou společností pro osvětlování. Protokol o světelně technickém měření najdete v **příloze č.2**. Měření bylo provedeno 23.3.2010. Součástí protokolu jsou i normové požadavky na umělé osvětlení, ze kterých je vycházeno dále při návrhu nové osvětlovací soustavy.

Protokol stanovuje tyto normové požadavky na umělé osvětlení²⁸:

Rovnoměrnost je požadována v celém měřeném prostoru jako rovnoměrnost v okolí zrakového úhlu – 0,5.

Požadavky na **Ra** pro trvalý pobyt – vyšší než 80.

pro přední část haly

výrobní zařízení s trvalým ručním ovládáním

$E_m = 200\text{lx}$

$UGR = 25$

$R_a = 80$

pro zadní část haly

výrobní zařízení s občasným ručním ovládáním

$E_m = 150\text{lx}$

$UGR = 28$

$R_a = 40$

pro pracovní stůl

Zpracování a opracování kovů, jemné strojní opracování,

$E_m = 500\text{lx}$

broušení: tolerance < 0,1 mm

$UGR = 19$

$R_a = 60$

Závěr protokolu konstatuje že, stávající osvětlovací soustava nevyhovuje současným požadavkům a doporučujeme její okamžitou výměnu.

²⁸ ČSN EN 12464-1 Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory

6. Výpočty denního osvětlení průmyslové haly

6.1. Současný stav denní osvětlenosti

Hala strojní údržby je situována v podélném směru přesné východ – západ. Zeměpisná šířka a délka byla zjištěna pomocí Internetu z mapových podkladů na maps.google.com. Zeměpisná délka je: 18,65 a zeměpisná šířka 49,66. Uprostřed **Obr. 34** je zmiňovaná budova označená. Nachází se uprostřed zeleného obdélníku. Na budově je dobře patrných 7 světlíků. V návrhu se však vyskytuje jen 6 světlíků a to z prostého důvodu, jeden světlík (úplně vpravo) je zastavěn a nachází se pod ním budova skladu.



Obr. 34 – Hala strojní údržby VP uprostřed snímku. Na hale jsou dobře patrné světlíky.

Zdroj: <http://maps.google.com>

Současný stav denní osvětlenosti nebyl zjišťován a to z prostého důvodu. Světlíky jsou v tak špatném stavu, že se v podstatě dá hovořit o vnitřním prostoru bez denního světla. Budova se totiž nachází v areálu koksovny a odvalu strusky. V tomto prostoru je naprosto mimořádná prašnost a snahy o udržení čistoty světlíků vždy po nějaké době ztroskotaly. Je třeba říct, že existují plány na rekonstrukci světlíků a jejich přebudování na čistě zenitní světlíky z polykarbonátu. Z těchto důvodů jsem do výpočtu denní osvětlenosti zavedl hodnoty odpovídající takovému stavu. Rozměr jednoho světlíku je 3 x 10,2m. Činitel ztrát světla stínícími částmi = 0,8, rovněž činitel ztrát světla znečištěním jsem stanovil na hodnotu 0,7.

Normou²⁹ stanovené požadavky na denní osvětlenost:

Obrábění a dělení materiálu jemné

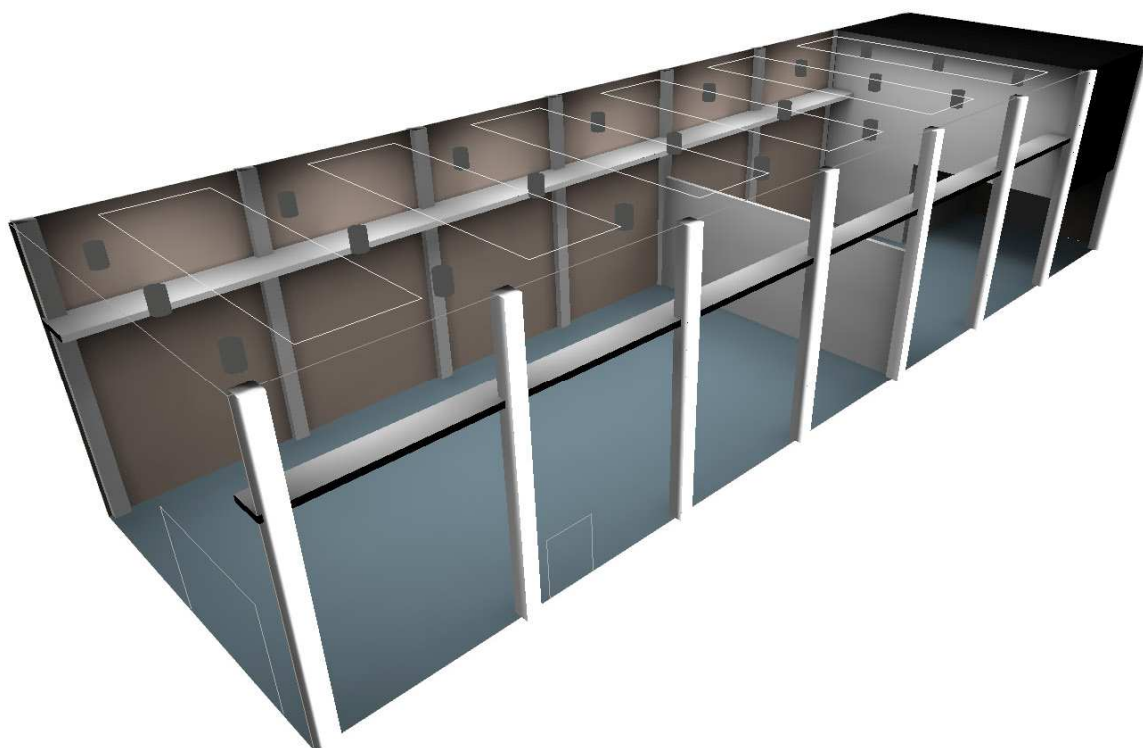
- třída zrakové činnosti III
- denní osvětlenost minimální $e_{\min} = 2\%$
- denní osvětlenost průměrná $e_m = 6\%$

6.2. Výpočet denní osvětlenosti

Na základě podkladů uvedených v kapitolách 5.1 a 6.1. jsem prostřednictvím programu RELUX Professional 2007 provedl simulaci vnitřního prostředí haly a výpočtem stanovil parametry denní osvětlenosti. Celý výpočet naleznete v příloze č.3 – Návrh osvětlení průmyslové haly v TŽ, a.s. – denní osvětlení.

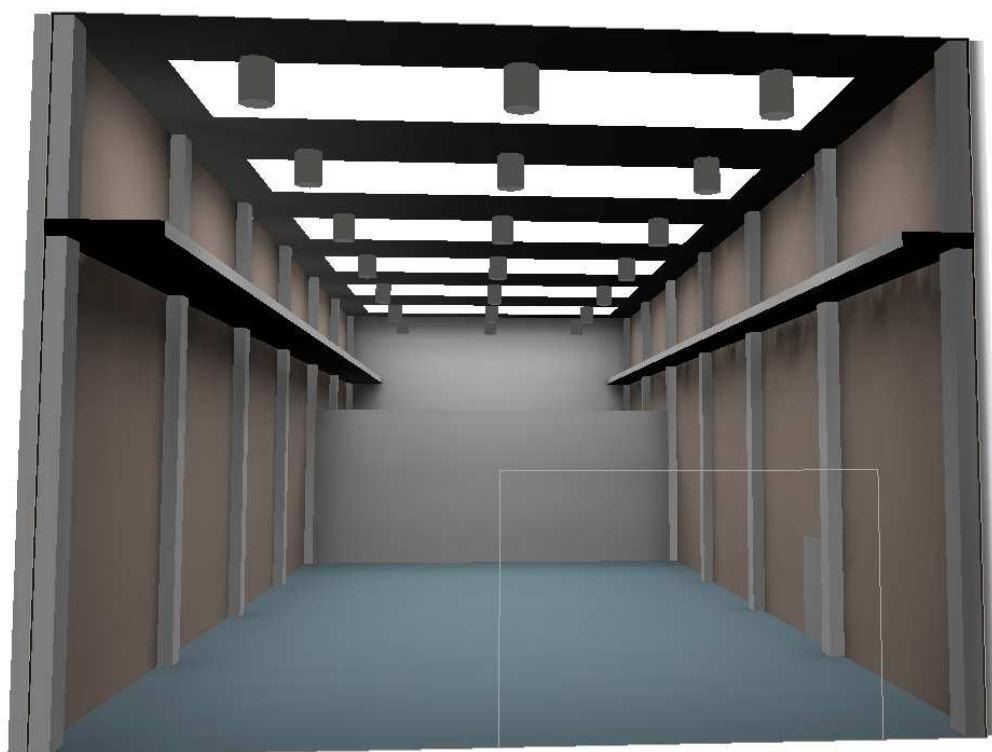
Výsledkem výpočtu je ověření skutečnosti, že v případě renovace světlíků bude denní osvětlenost v hale vyhovovat s velkou rezervou.

Ukázky 3D modelování denní osvětlenosti v programu RELUX Professional 2007

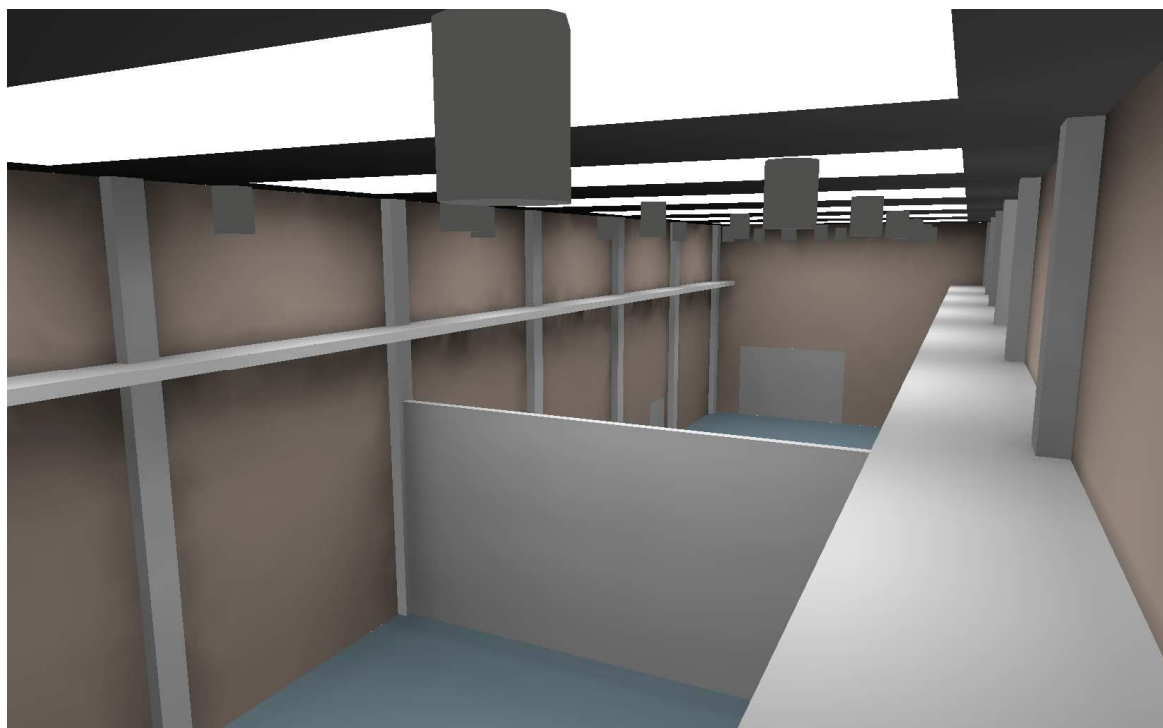


Obr. 35 – 3D modelování denní osvětlenosti v programu RELUX Professional 2007

²⁹ ČSN 73 0580-4 Denní osvětlení budov Část 4: Denní osvětlení průmyslových budov



Obr. 36 - 3D modelování denní osvětlenosti v programu RELUX Professional 2007



Obr. 37 - 3D modelování denní osvětlenosti v programu RELUX Professional 2007

7. Výpočty umělého osvětlení průmyslové haly

7.1. Klasická osvětlovací soustava

Pro klasickou osvětlovací soustavu bylo vybráno svítidlo LAMA Q/252 osazené halogenidovou výbojkou HQI-E 250/D. Pro tuto kombinaci byl vytvořen výpočetní model, přesně tak aby respektoval umístění současných svítidel a tím se ušetřila nemalá částka za instalaci nového elektrorozvodu. Výsledky výpočtu najdete v příloze č.4.

Matematický model dokazuje, že zvolené řešení je optimální a má i dostatečnou rezervu na případné odchylky modelu od praktického řešení.

7.2. Inovativní osvětlovací soustava

Pro inovativní osvětlovací soustavu bylo vybráno svítidlo VYRTYCH Pitbul-Endura osazené indukční výbojkou ENDURA 150/840. Také pro tuto kombinaci byl vytvořen výpočetní model. Bohužel nebylo možné zachovat současné rozmístění svítidel z důvodu menšího výkonu světelného zdroje a tím nižšího světelného toku svítidla. Bylo nutné přidat celou řadu svítidel. Celkový počet svítidel je tedy 28ks. Výsledky výpočtu najdete v příloze č.5.

Matematický model splňuje požadavky na osvětlenost ve všech bodech. Rovněž s dostatečnou rezervou na případné odchylky modelu od praktického řešení.

8. Možnosti řízení osvětlovací soustavy v kombinaci s denním světlem

8.1. Stmívání

Navrhované osvětlovací soustavy, respektive světelné zdroje v nich nainstalované, neumožňují plynulou regulaci světelného toku elektronickým stmíváním.

8.2. Přepínání okruhů

Rovněž přepínání okruhu není v tomto případě žádoucí. Značně by se tímto způsobem zhoršila rovnoměrnost osvětlení. Pro takovéto řešení by bylo nutné instalovat větší počet svítidel s menším výkonem světelného zdroje. To by ovšem neúměrně zvyšovalo náklady na instalaci nové osvětlovací soustavy, nejen většími náklady na svítidla, ale především nutností přestavby celého elektrorozvodu. Vzhledem k jednosměnnému provozu (cca 2000h za rok) by byla taková investice značně neefektivní.

9. Ekonomické vyhodnocení obnovy osvětlovací soustavy

Podrobné výsledky ekonomického vyhodnocení se nacházejí vždy na konci každého výpočtu, a to jak denní osvětlenosti, tak i umělého osvětlení. Ve výpočtu denní osvětlenosti jsou posuzovány možnosti úspor při kombinaci denního a umělého osvětlení. Na základě tohoto výpočtu byly vyčísleny úspory el. energie na částkou 14660 Kč za rok. Je to jen teoretická možnost úspor, protože navrhované světelné zdroje neumožňují stmívání a jiné řešení taky nepřipadá v úvahu (viz. kapitola 8). Navíc se nejedná o částku nějak významnou, aby zdůvodnila výrazné navýšení investičních nákladů na obnovu osvětlovací soustavy.

	Klasická osvětlovací soustava s HQI-E 250W/D	Inovativní osvětlovací soustava s ENDURA 150
Náklady na obnovu osvětlovací soustavy	91 896 Kč	444 360 Kč
Celkové roční provozní náklady	18 494 Kč	22 288Kč

Tab. 7 – Ekonomické vyhodnocení jednotlivých řešení

Pouhým pohledem na Tab. 7 zjistíme, že klasická osvětlovací soustava má jednoznačně navrch a je ekonomicky nejvýhodnější.

10. Závěr

Tato práce jednoznačně ukázala, že ještě nedozrál čas pro aplikaci indukčních výbojek v běžných osvětlovacích soustavách. Jejich vysoká životnost zdaleka není zárukou ekonomické návratnosti investice. Tyto moderní světelné zdroje najdou uplatnění především tam, kde není možné z provozních důvodů konat pravidelnou údržbu. Extrémně dlouhý život je výhodný zejména v provozech s obtížným přístupem ke svítidlům anebo v místech, kde obsluha osvětlení vyžaduje nežádoucí přerušení provozu (např. v silničních tunelech, osvětlení dopravních značek, ve výrobních halách s rozměrným výrobním zařízením apod.), protože umožňuje prodloužit intervaly výměny světelných zdrojů a výrazně snižuje náklady na údržbu.

Literatura:

- [1] SOKANSKÝ, K. a kolektiv, Racionalizace v osvětlování venkovních prostor, ČSO regionální skupina Ostrava, OSTRAVA 2005
- [2] SOKANSKÝ, K. a kolektiv, Dominantní vlivy ovlivňující spotřebu elektrické energie osvětlovacích soustav, ČEA, Ostrava 2007
- [3] RYBÁŘ, Petr. Denní osvětlení a oslunění budov. 1. Vyd. Brno: ERA, 2001. 271 s. ISBN 80-86517-33-0
- [4] SOKANSKÝ, Karel. Elektrické světlo a teplo. Ostrava: VŠB, 1990. 283 s. ISBN 80-7078-061-4
- [5] PLCH, Jiří. Světelná technika v praxi. Praha: IN-EL, 1999. 207 s. ISBN 80-86230-09-0
- [6] HABEL, Jiří. Světelná technika a osvětlování. Praha: FCC Public, 1995. 448 s. ISBN 80-901985-0-3
- [7] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje – halogenidové výbojky. FCC Public, časopis SVĚTLO 2009/1
- [8] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje – kompaktní zářivky. FCC Public, časopis SVĚTLO 2008/3
- [9] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje – obyčejné žárovky. FCC Public, časopis SVĚTLO 2008/4
- [10] TNI 36 0451 Údržba vnitřních osvětlovacích soustav
- [11] ČSN EN 12665 Světlo a osvětlení – Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení
- [12] ČSN EN 12464-1 Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory
- [13] ČSN 73 0580-1 – Denní osvětlení budov – Část 1: Základní požadavky. ČNI, 2007. 24 s.
- [14] ROCHLIN, G. N.: Razrjadnyje istočniki sveta. Energoatomizdat, 1991.
- [15] Katalog firmy Osram 2008/2009.
- [16] Technická dokumentace firmy Philips.
- [17] <http://www.4-construction.com> – světelné zdroje
- [18] <http://www.cree.com/press/pressreleases.asp> - přední světový výrobce LED
- [19] <http://www.scienceweek.cz/> - měrné výkony světelných zdrojů
- [20] <http://www.energetik.cz/> - světelné zdroje, normy
- [21] <http://www.osvetle.cz/> - všeobecné informace LED

Seznam příloh:

- Příloha č.1 – Situační schéma budovy (haly) strojní údržby VP
- Příloha č.2 – Světelně technické měření: Posouzení parametrů umělého osvětlení
- Příloha č.3 – Návrh osvětlení průmyslové haly v TŽ, a.s. – Výpočet denního osvětlení
- Příloha č.4 – Návrh osvětlení průmyslové haly v TŽ, a.s. – Výpočet klasického umělého osvětlení
- Příloha č.5 – Návrh osvětlení průmyslové haly v TŽ, a.s. – Výpočet inovativního umělého osvětlení
- Příloha č.6 – Katalogové listy použitých světelných zdrojů a svítidel

